Für die Vollständigkeit und Richtigkeit der einzelnen Inhalte der Vorlesung 61-020 „Einführung in die Pflanzenphysiologie“ kann keine Gewähr übernommen werden.

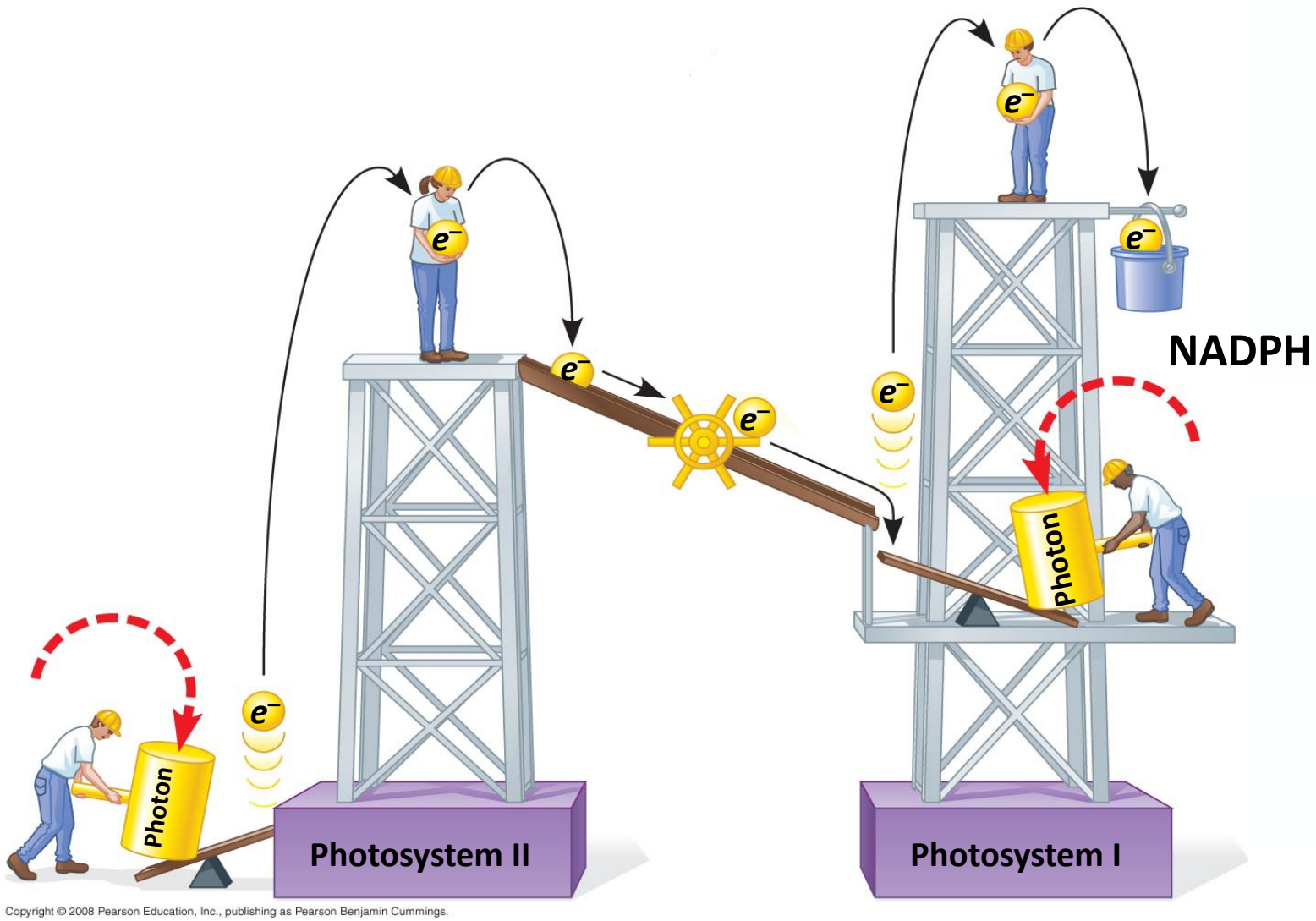
Es ist nicht gestattet, diese Vorlesung oder Teile dieser Vorlesung ohne ausdrückliche Genehmigung der Dozentinnen und Dozenten für die Wiedergabe im Druck, Vorträge oder eine andere Art der Veröffentlichung, auch nicht im Internet, zu verwenden. Für Teile der Abbildungen liegen die Rechte bei Buchverlagen, wissenschaftlichen Zeitschriften oder bei den Dozentinnen und Dozenten dieser Veranstaltung.

Hamburg, 28.11. 2022 Prof. Stefan Hoth

Geplanter Ablauf der Vorlesung

17. Oktober 2022	Wasserhaushalt
24. Oktober 2022	Mineralstoffernährung
7. November 2022	Mineralstoffernährung/ Bodenkunde
14. November 2022	Photosynthese
21. November 2022	Photosynthese
28. November 2022	Photosynthese
5. Dezember 2022	Photosynthese
12. Dezember 2022	Photosynthese
19. Dezember 2022	Pflanzenhormone
9. Januar 2023	Pflanzenhormone
16. Januar 2023	Pflanzenhormone
23. Januar 2023	Photosynthese/ Licht als Entwicklungsstimulus
30. Januar 2023	Licht als Entwicklungsstimulus

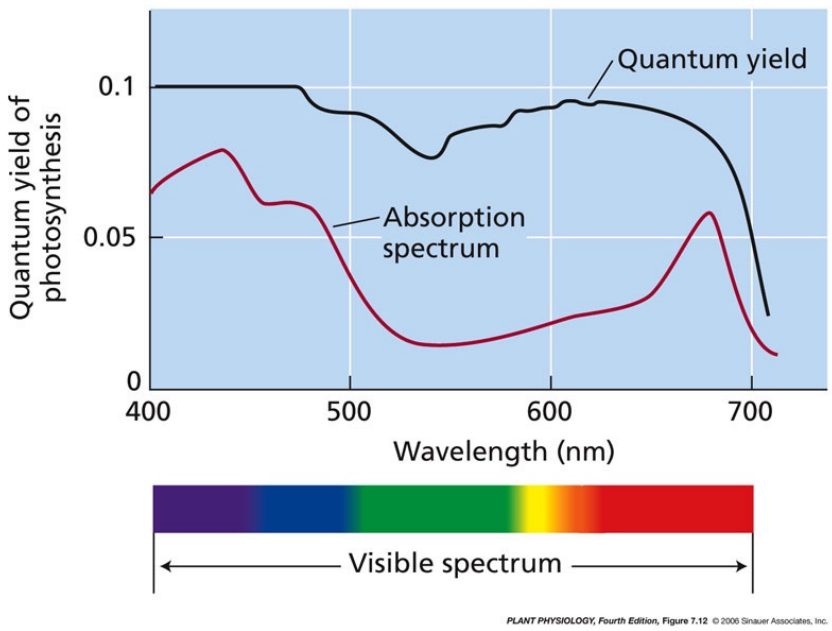
Die Überbrückung des ΔE_0‘ erfordert zweimal Energie!



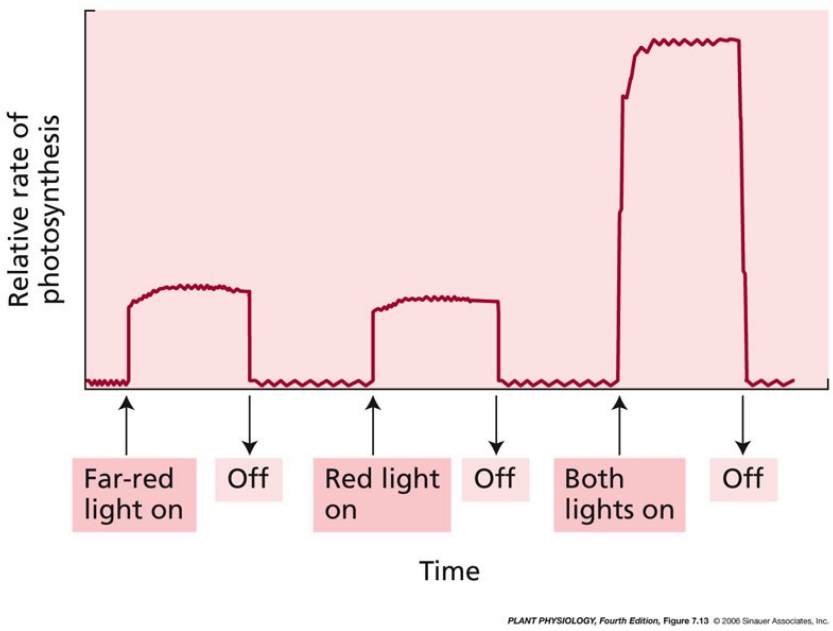
Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Benjamin Cummings.

Zwei Photosysteme - Woher wissen wir das???

Der „red-drop“ Effekt

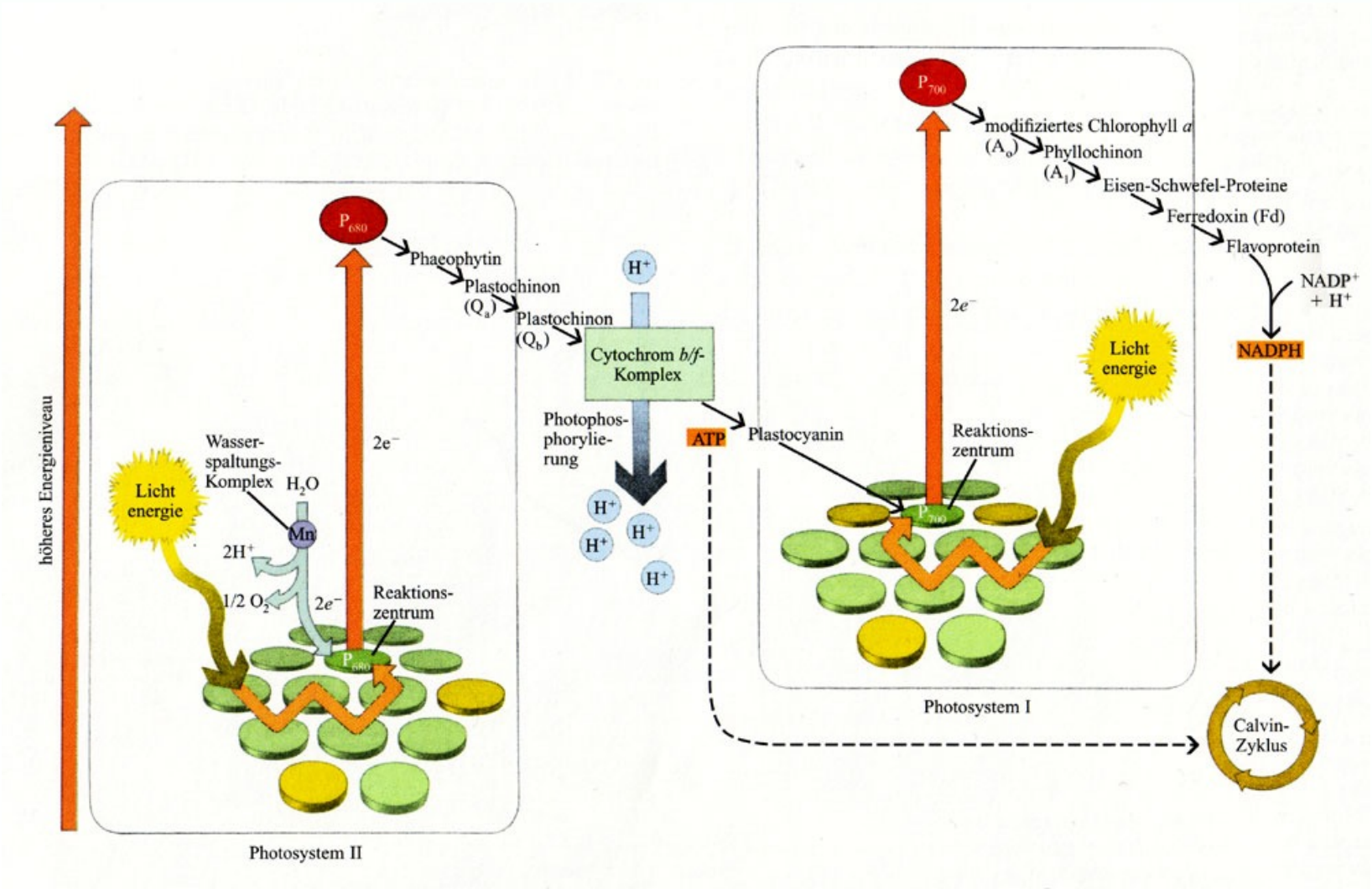


Der Emerson-Effekt



Quantenausbeute: Mol O_2 produziert pro Mol Quanten absorbiert

Jedes Photosystem besitzt eine Antenne

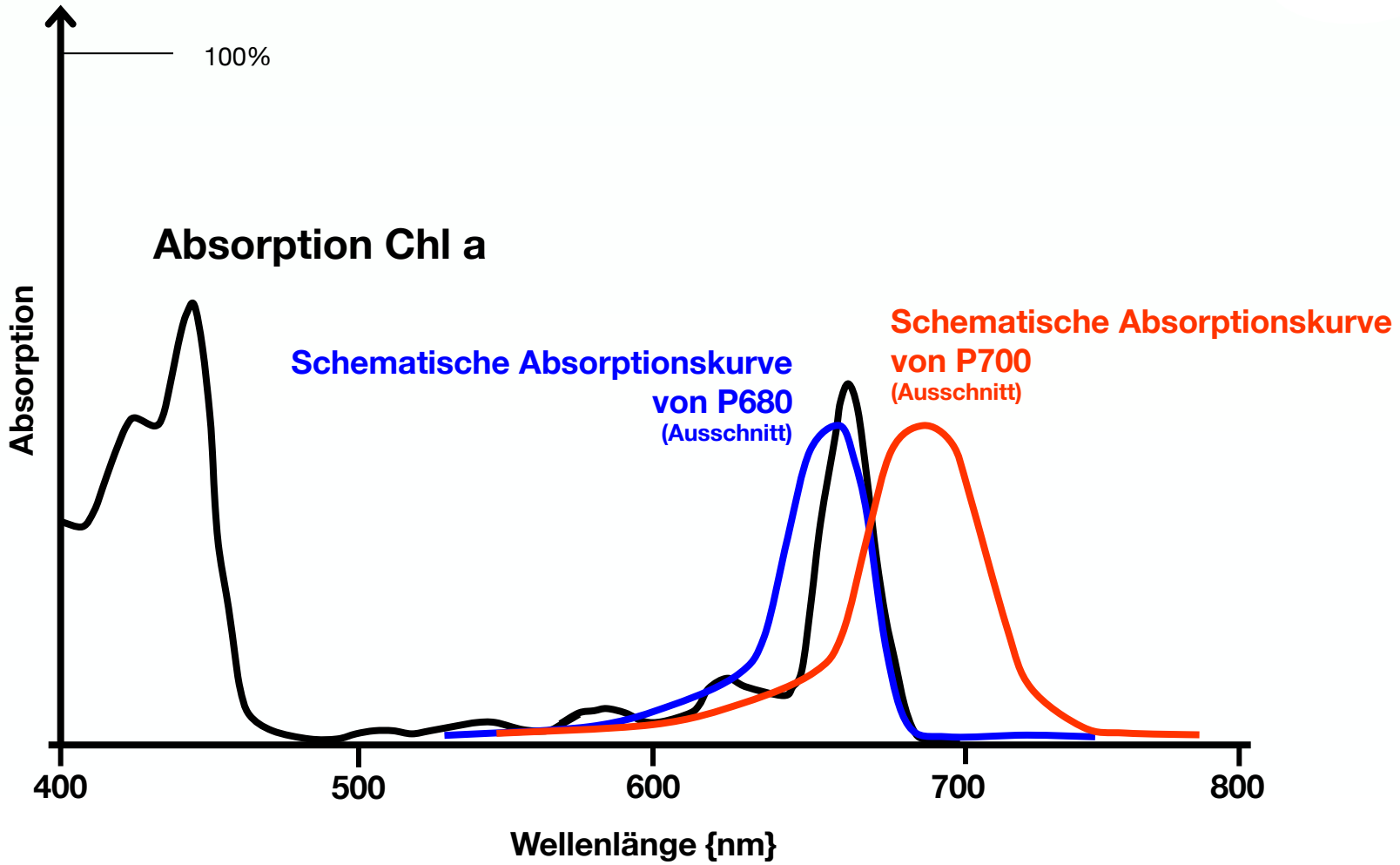


P 680 P 700

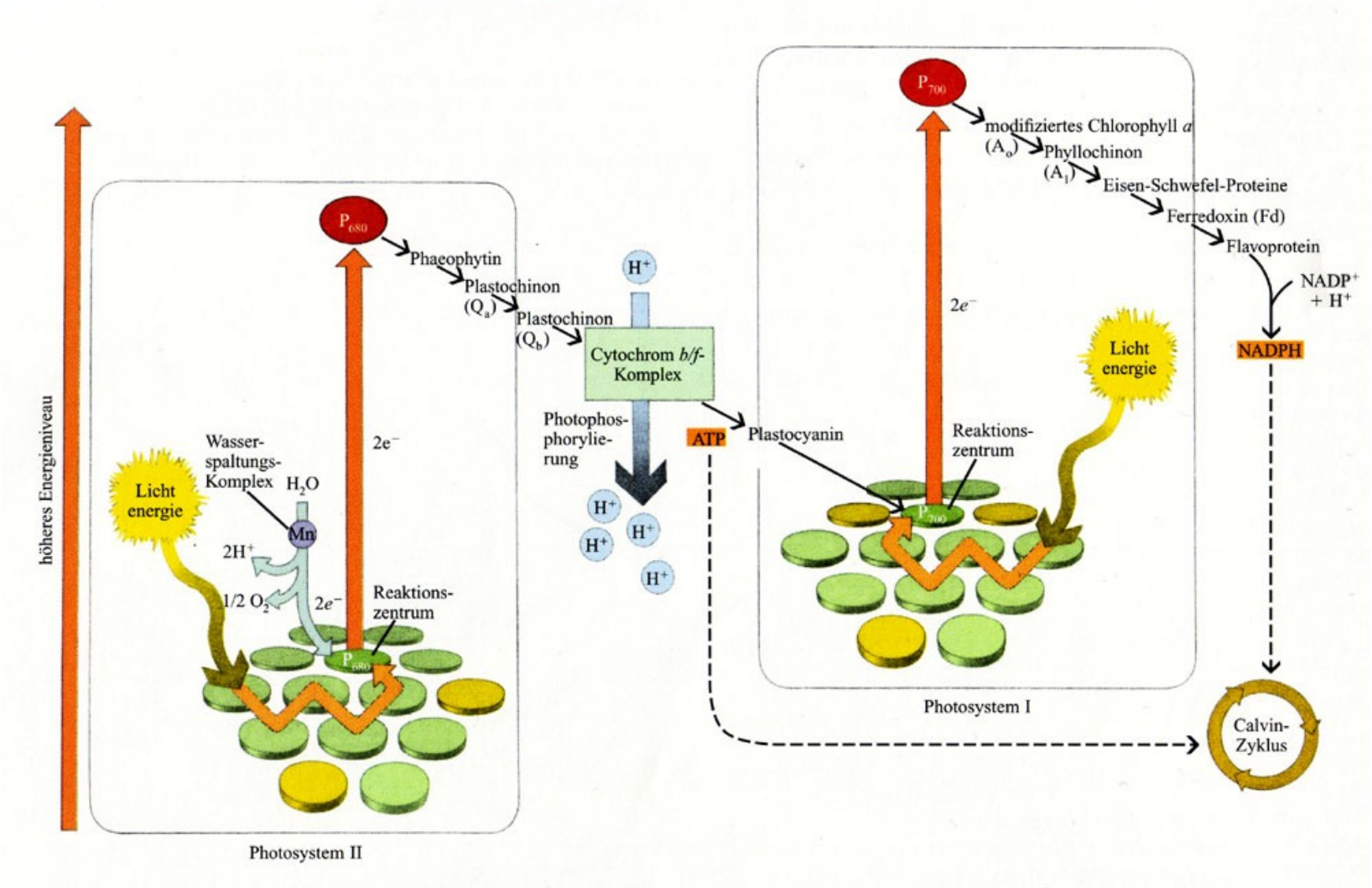
Die Photosysteme

- **Grünalgen und Pflanzen besitzen zwei Photosysteme, in denen die Ladungstrennung erfolgt: PSI und PSII.**
- **Im PSI besitzt das Chlorophyll ein Absorptionsmaximum bei 700 nm (P700)**
- **Im PSII besitzt das Chlorophyll ein Absorptionsmaximum bei 680 nm (P680)**
- **Sie enthalten je ein Reaktionszentrum, das aus einem Chlorophyll a - Dimer gebildet wird („special pair“)**

Abhängigkeit der Chl-Absorption von der Proteinumgebung

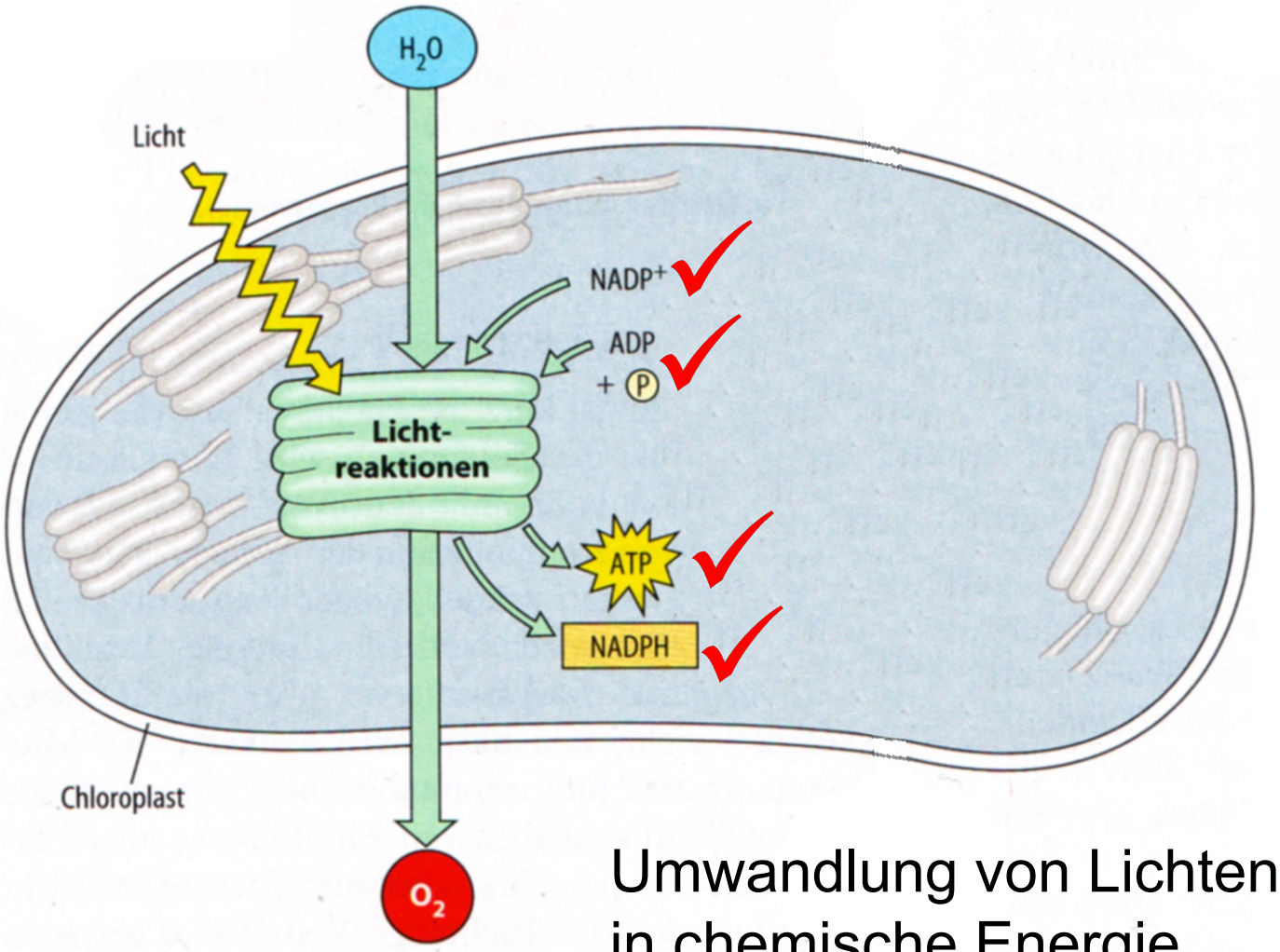


Jedes Photosystem besitzt eine Antenne



P 680 P 700

Produkte der Lichtreaktion



Umwandlung von Lichtenergie in chemische Energie

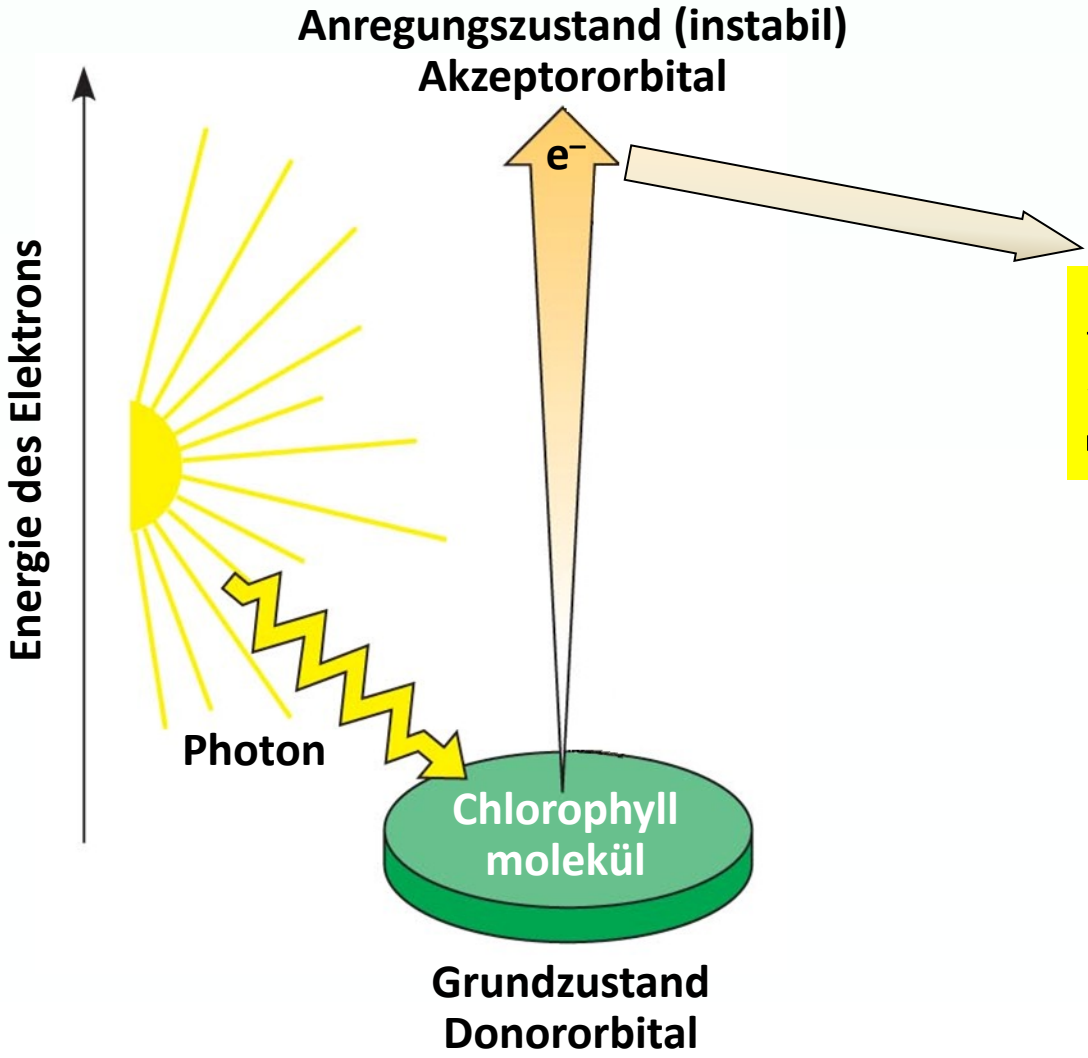
Licht- und Dunkelreaktionen

Die Photosynthese kann unterteilt werden in:

A) Die Lichtreaktionen,
die H_2O verbrauchen,
O_2, ATP und NADPH + H^+ produzieren,

B) Die Dunkelreaktionen,
die unter ATP und NADPH-Verbrauch
CO_2 in Kohlenhydrat umwandeln

Elektronen und Lichtenergie



Photochemie:
Abgabe des Elektrons
➡ Ladungstrennung

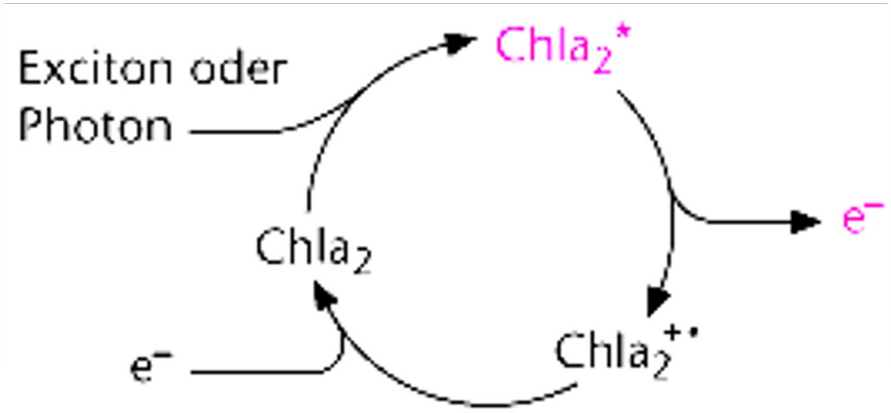
Akzeptororbital: wird
Reduktionsmittel

Donororbital: wird
Oxidationsmittel

Ladungstrennung im Chlorophyll

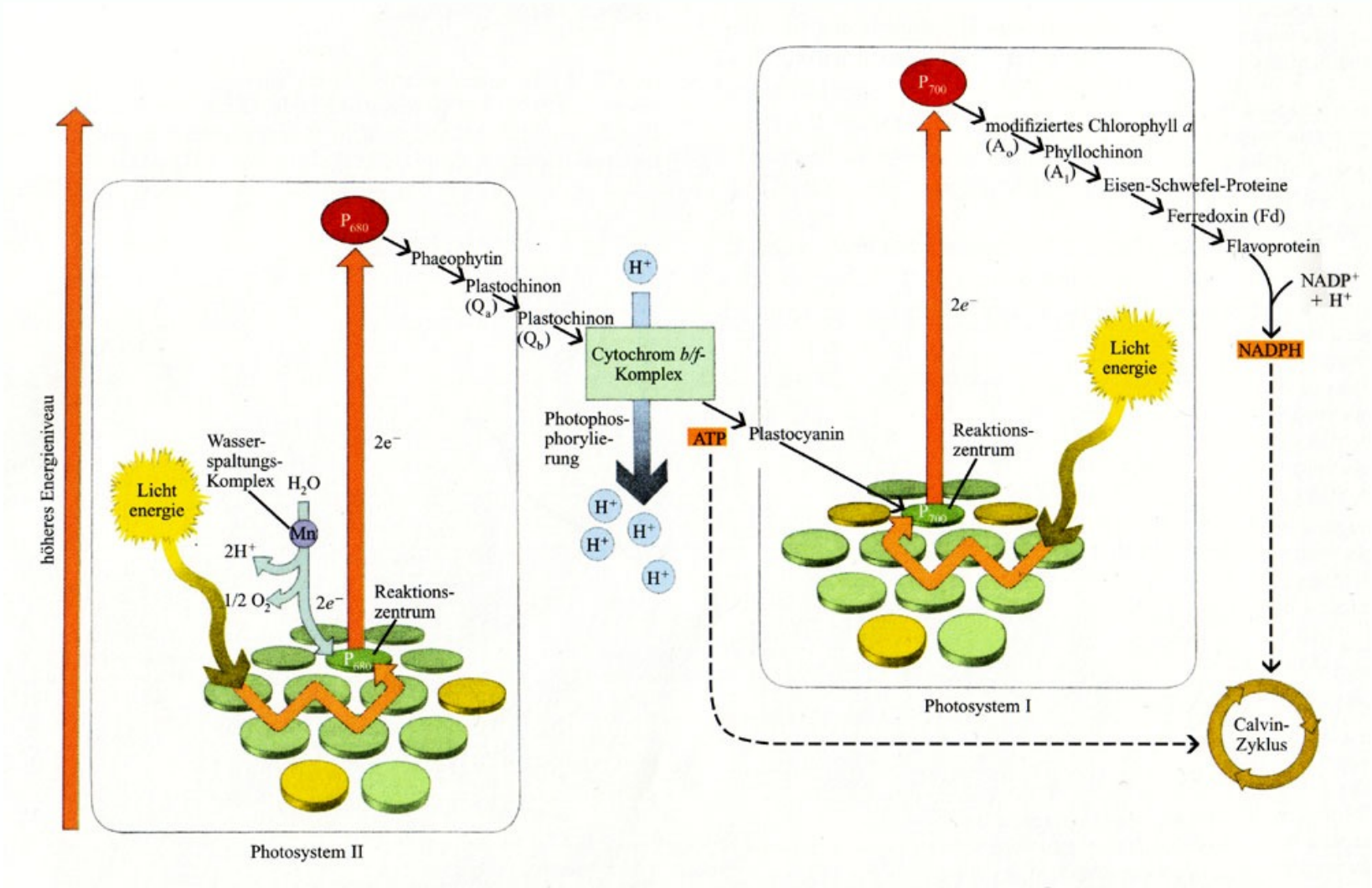
Die Lebensdauer des S1 Zustands des angeregten Chlorophylls liegt im Bereich von **Nanosekunden (10^{-9} s)**;

Die photochemische **Ladungstrennung** (das Abgeben eines angeregten e^- an ein anders Molekül) dauert **Picosekunden (ca. 3,5 ps; $3,5 \cdot 10^{-12}$ s)**;



Aufgrund der Schnelligkeit der Reaktion und der optimierten e^--Übertragung gibt es bei der Photosynthese praktisch keine Fluoreszenz und sie kann mit hoher Effizienz ablaufen!

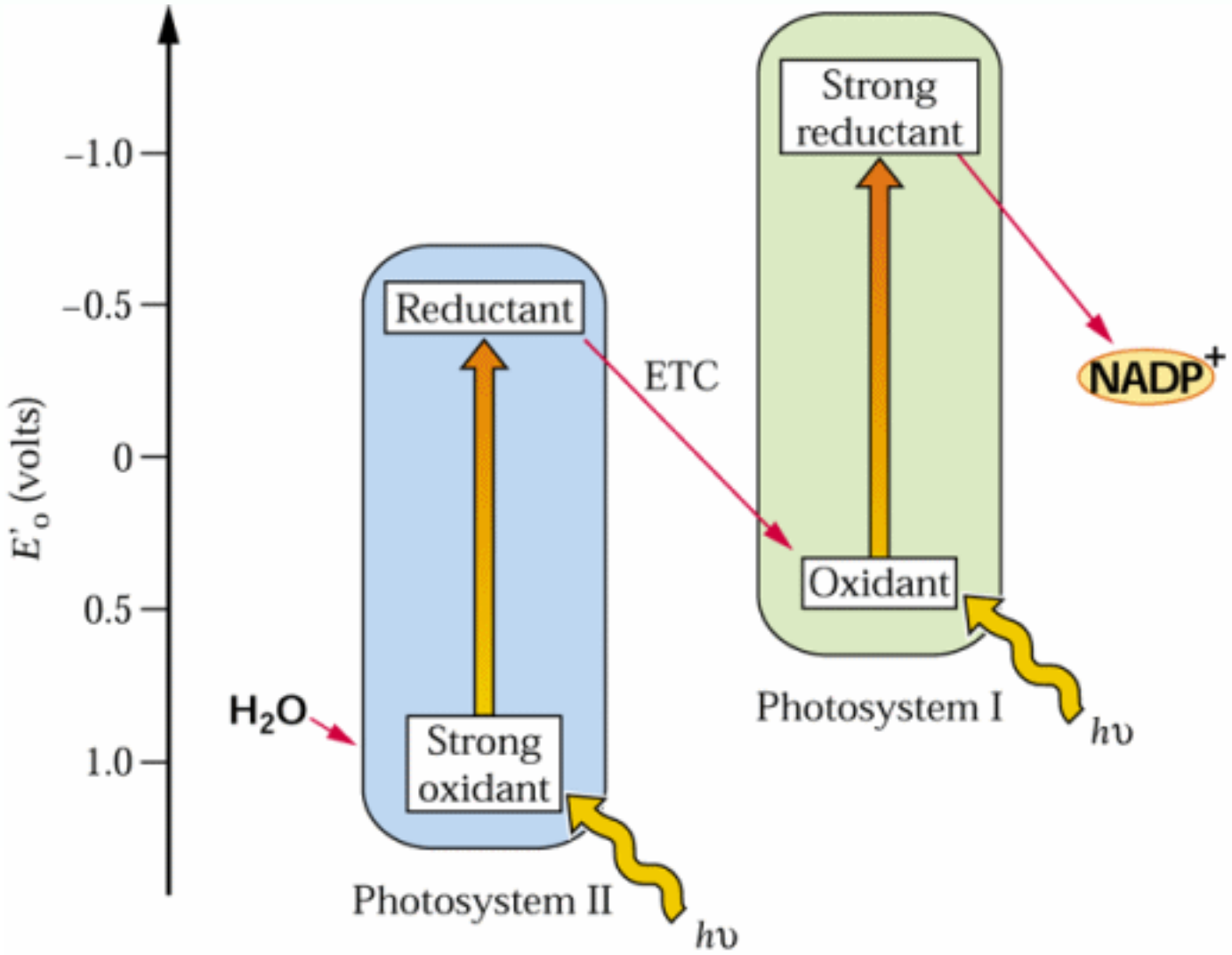
Die Elektronentransportkette



P 680 P 700

Redoxpotentiale

Maß für die Bereitschaft zu oxidieren bzw. zu reduzieren

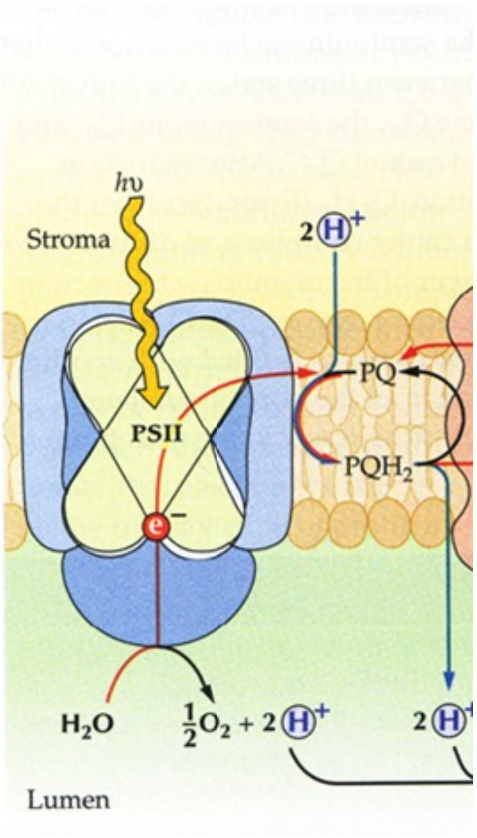


Der Weg der Elektronen

STROMA

Thylakoidmembran

LUMEN

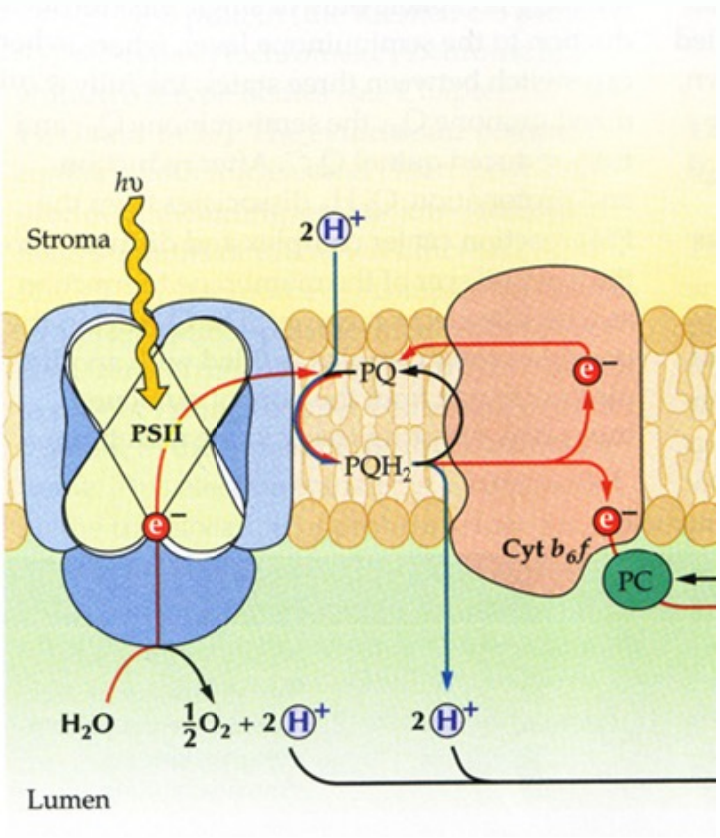


Der Weg der Elektronen

STROMA

Thylakoidmembran

LUMEN

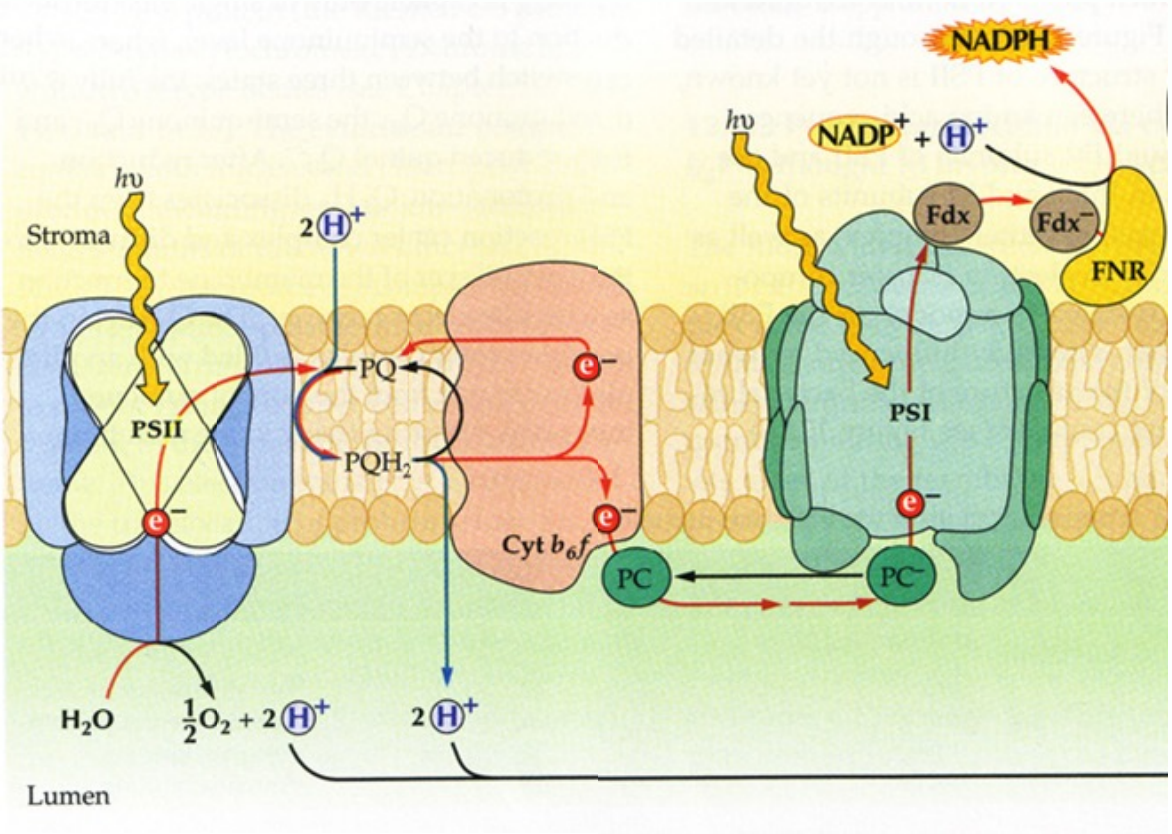


Der Weg der Elektronen

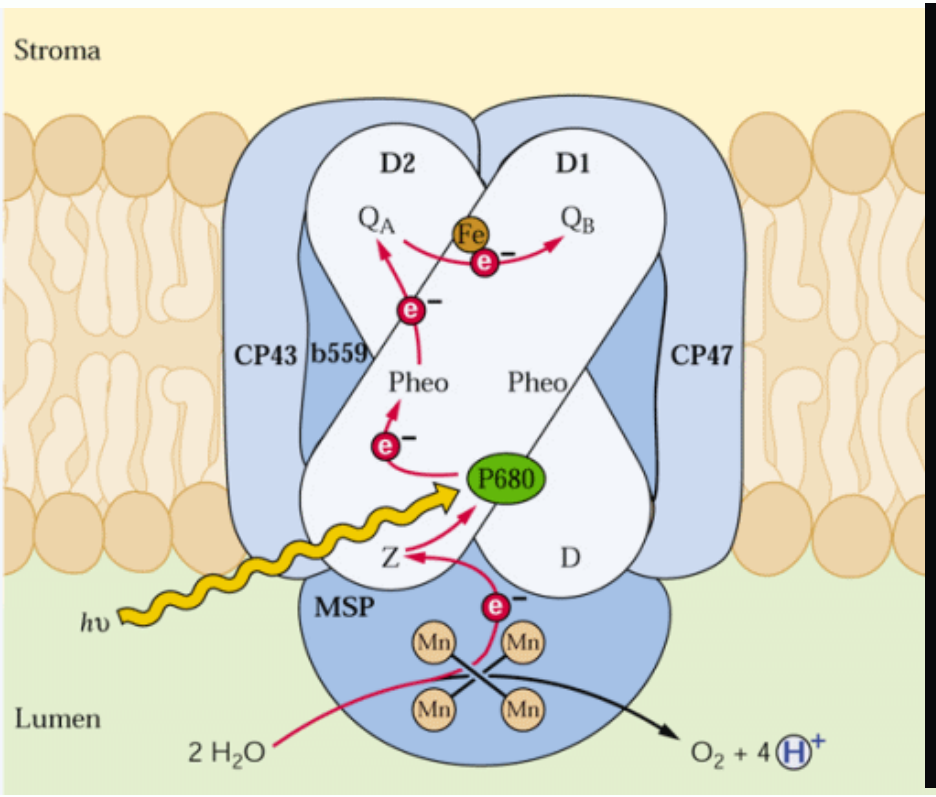
STROMA

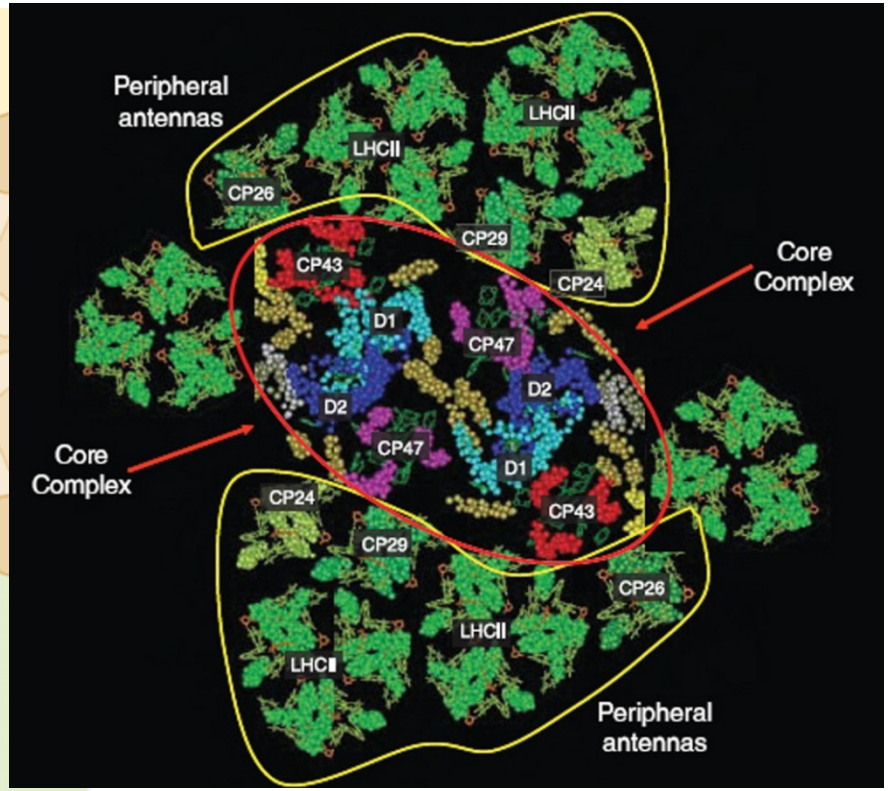
Thylakoidmembran

LUMEN



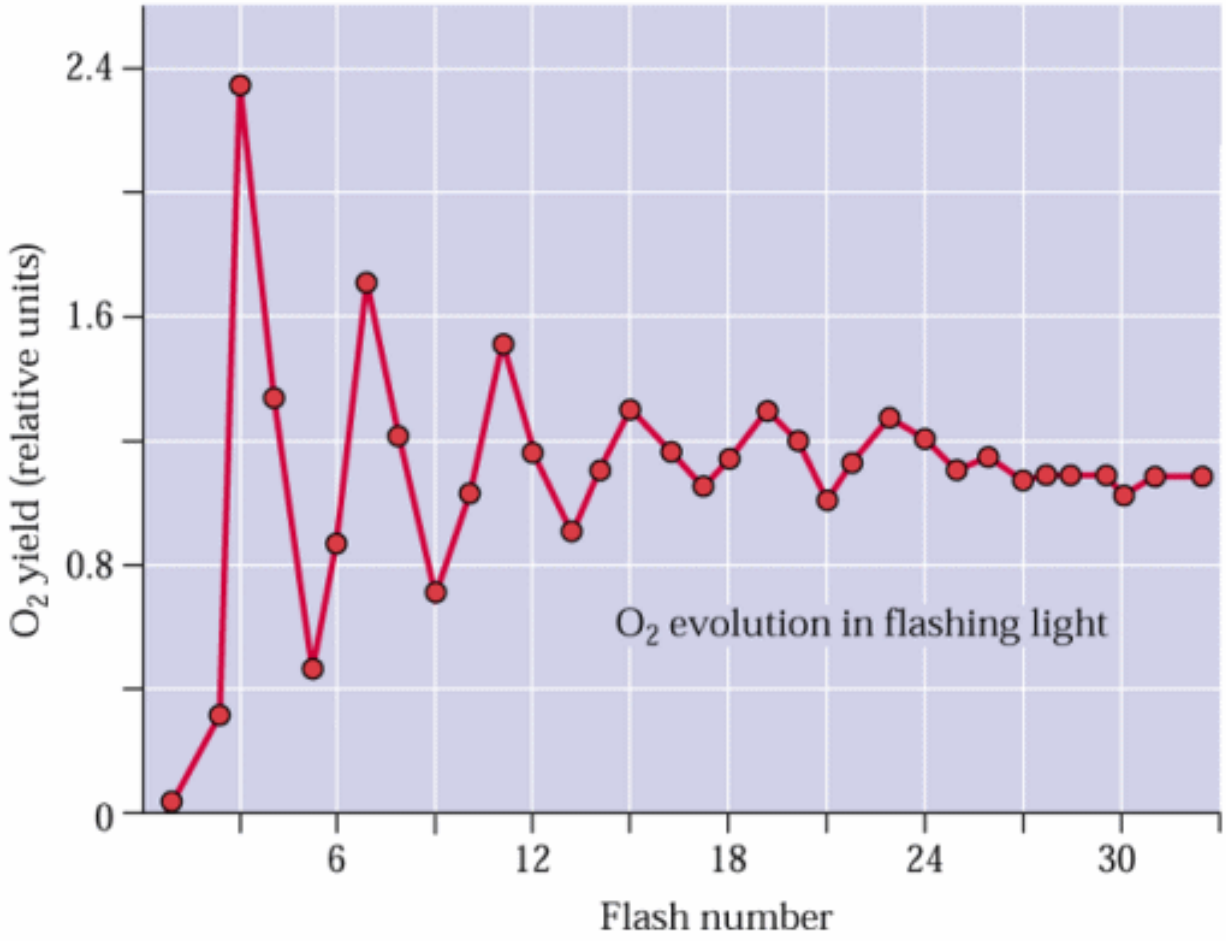
Das PS II



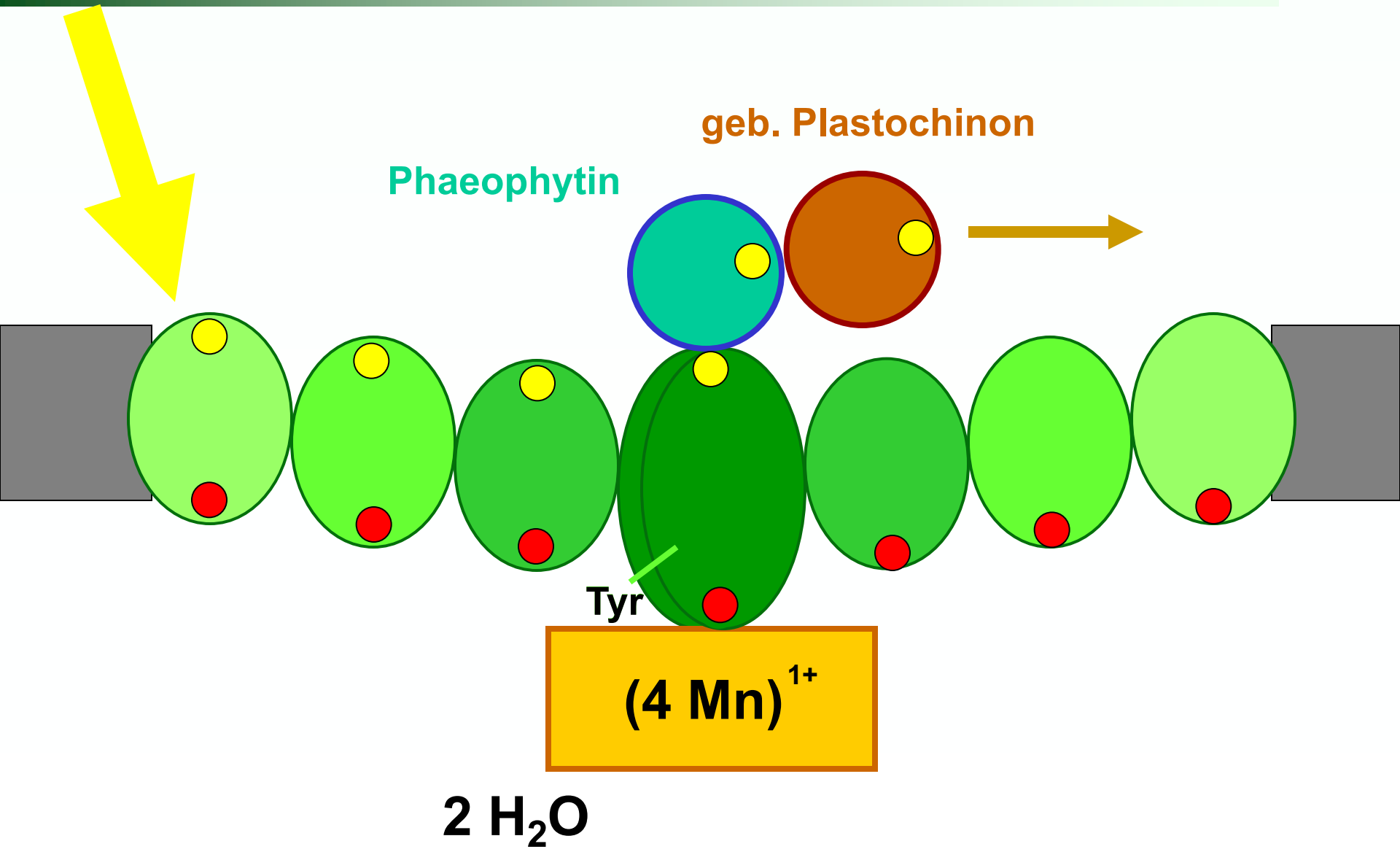


System S: Besteht aus 4 Manganatomen. Funktion als e^--Speicher

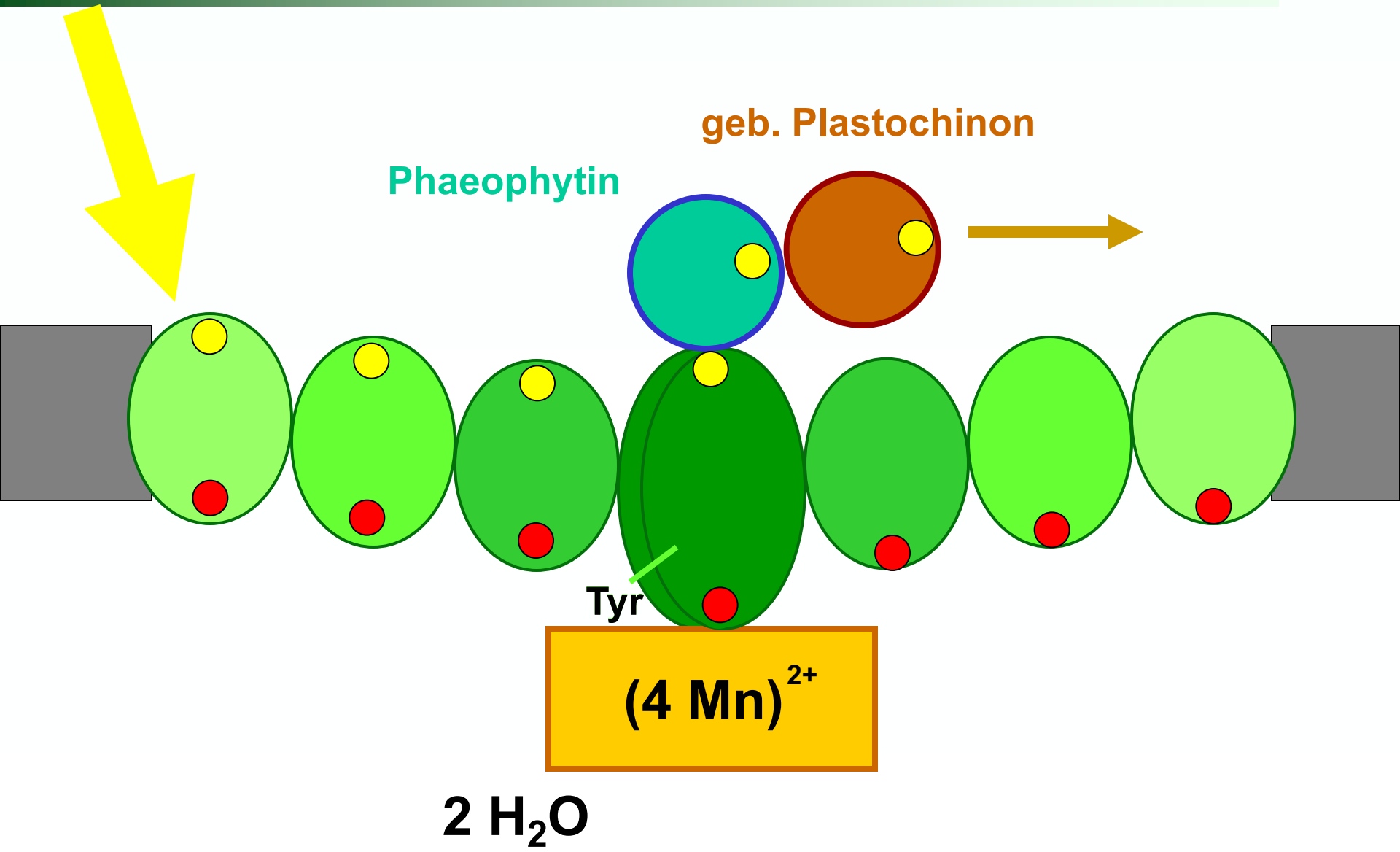
Sauerstoff entsteht in „bursts“



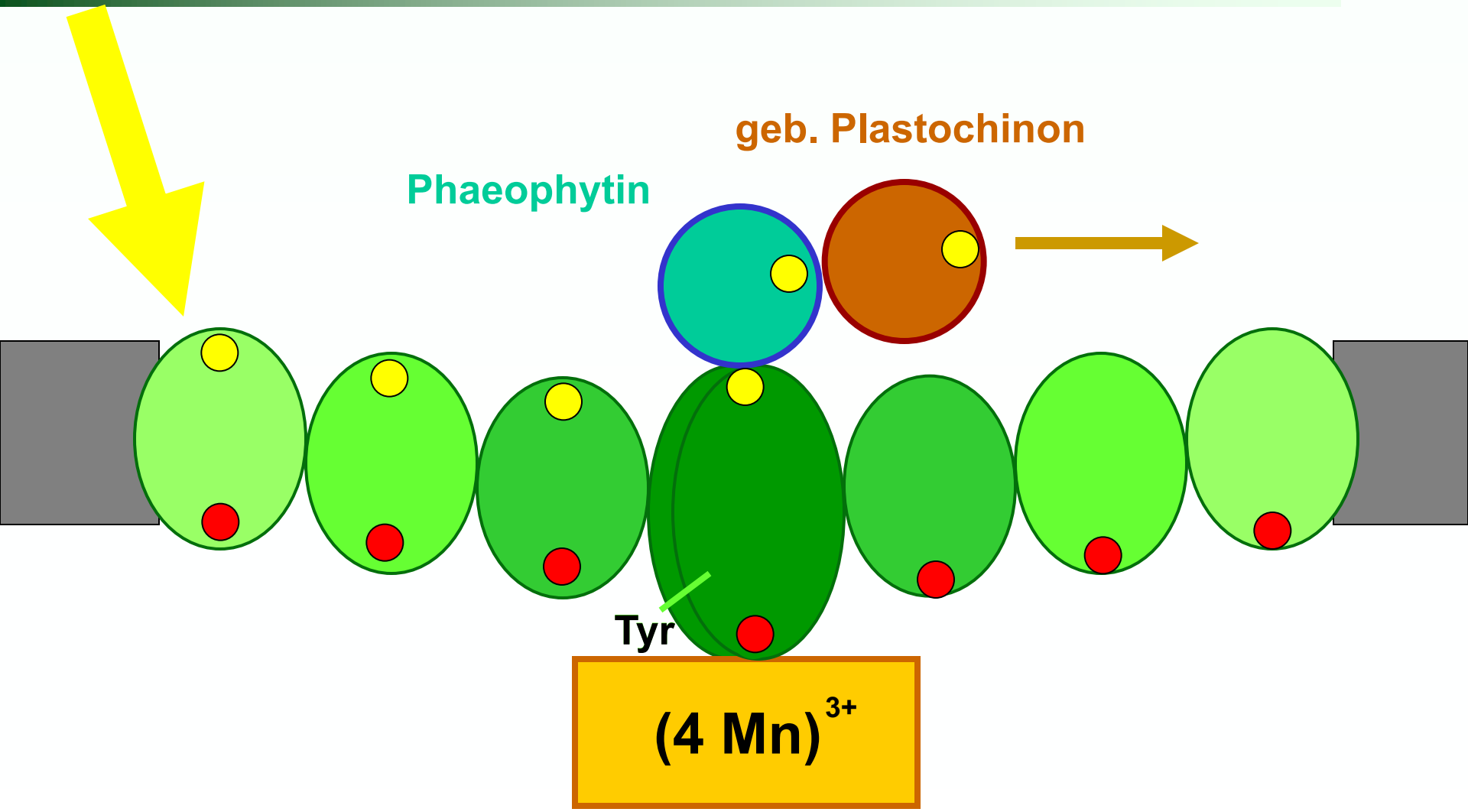
Sukzessive Oxidation



Sukzessive Oxidation

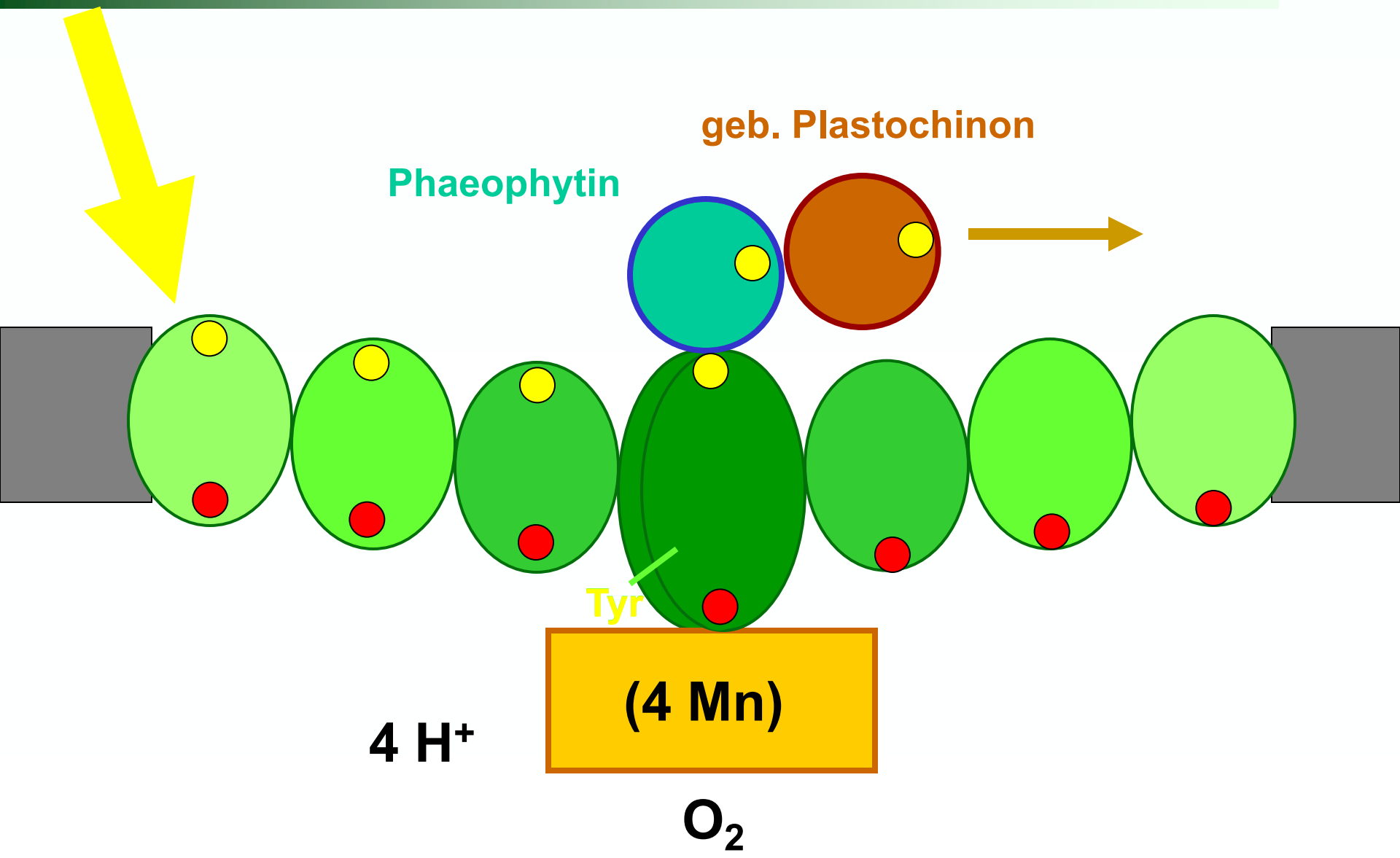


Sukzessive Oxidation

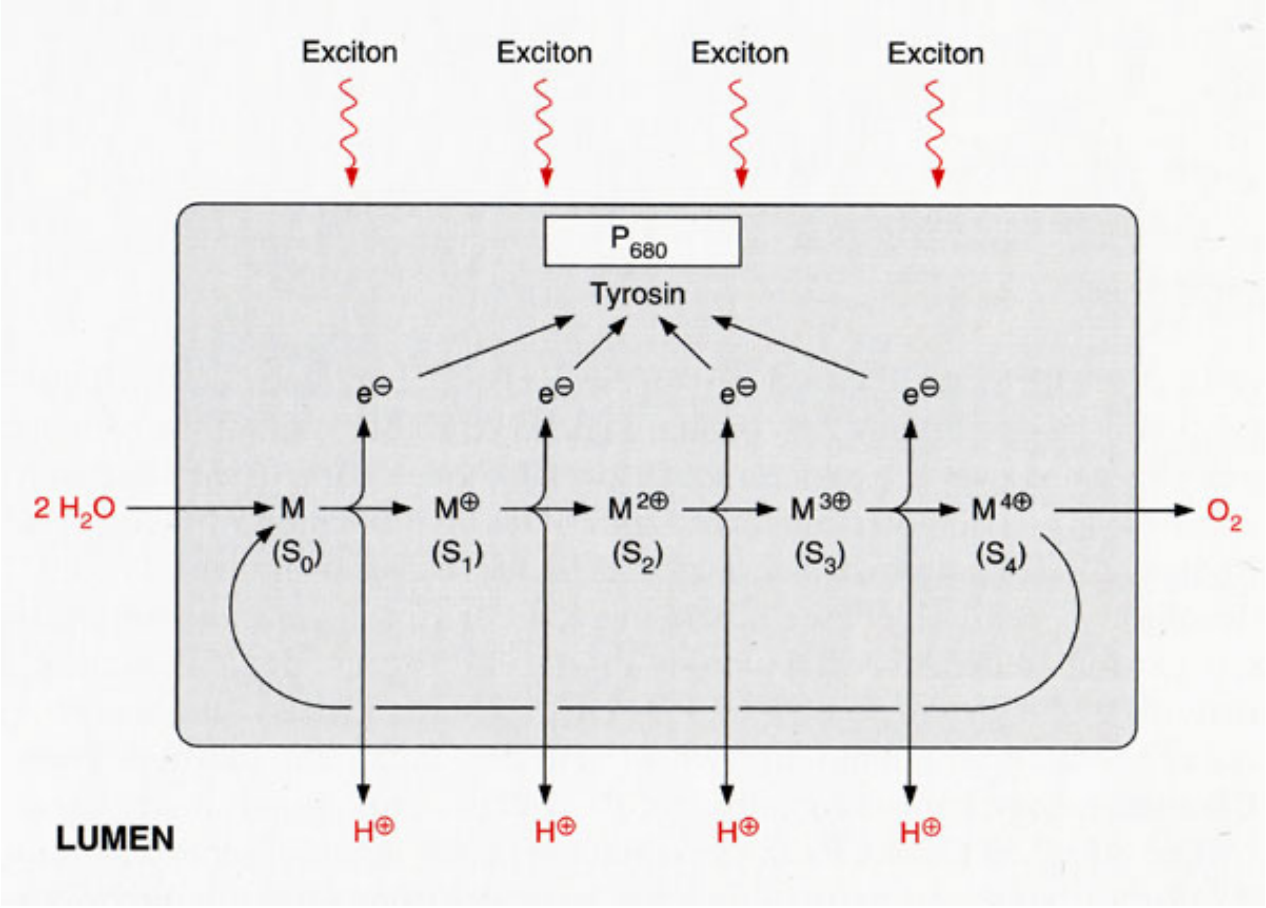


$2\ H_2O$

Sukzessive Oxidation



Das Mangancluster setzt O_2 frei



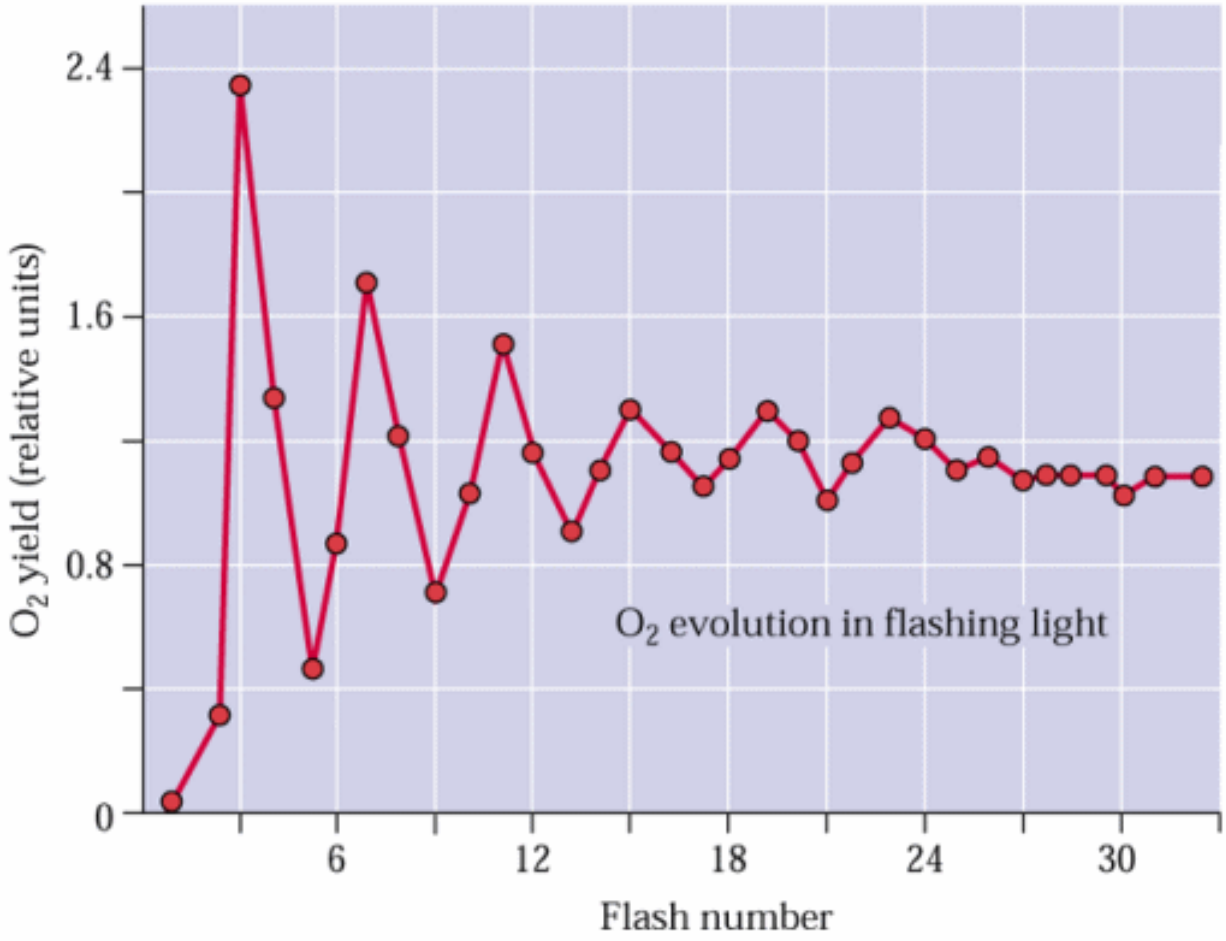
Insgesamt sind 4 Mangan-Ionen in einem sogenannten Mn-Cluster zu einem Redox-System verbunden.

$$M = (4\ Mn)^{n+}$$

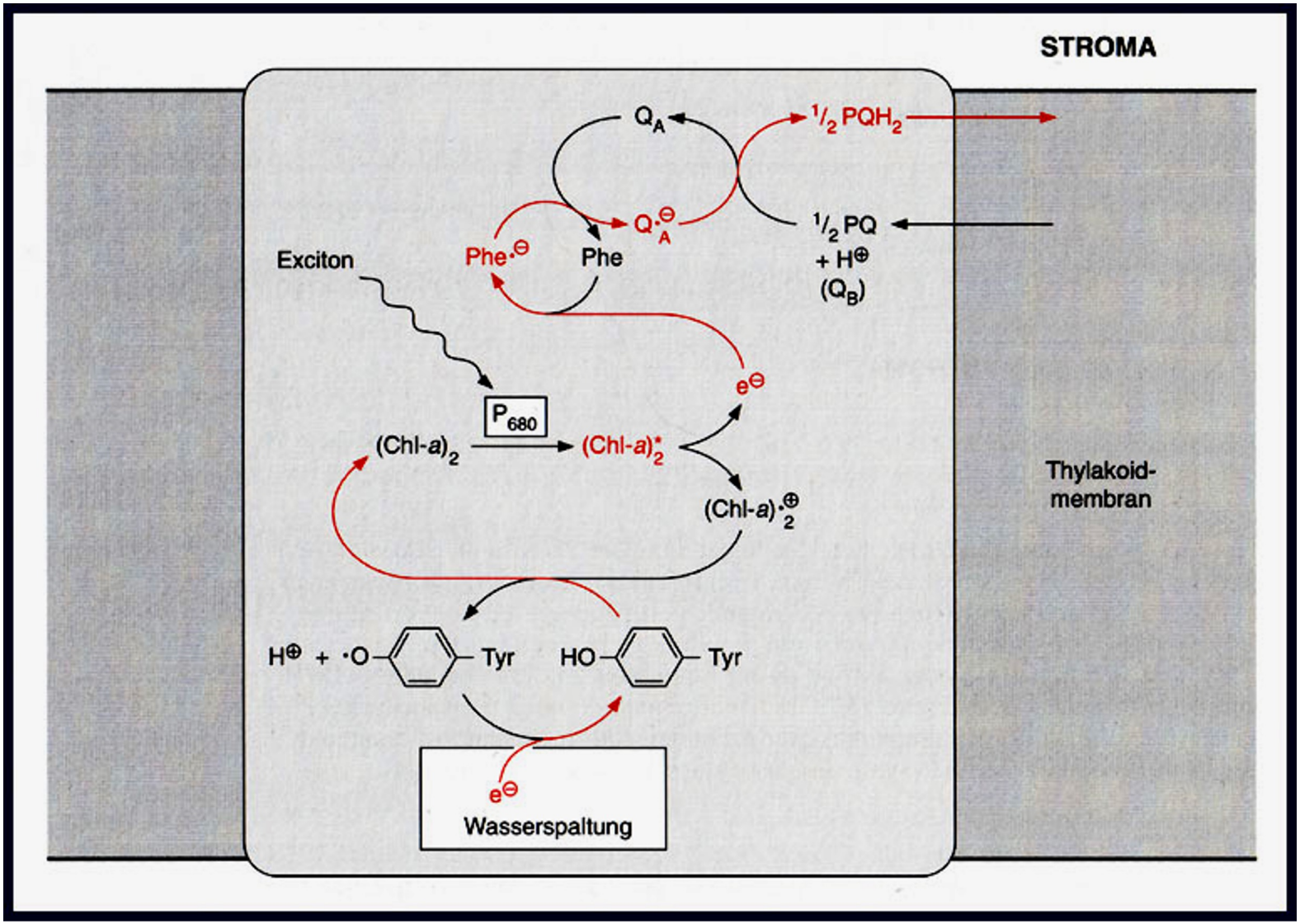
Dieses Mn-Cluster kann insgesamt 4 e^- abgeben und durch die Spaltung von zwei Molekülen H_2O wieder aufnehmen!

$$2\ H_2O + \text{Mn-Cluster}^{4+} \longrightarrow 4\ H^+ + O_2 + \text{Mn-Cluster}$$

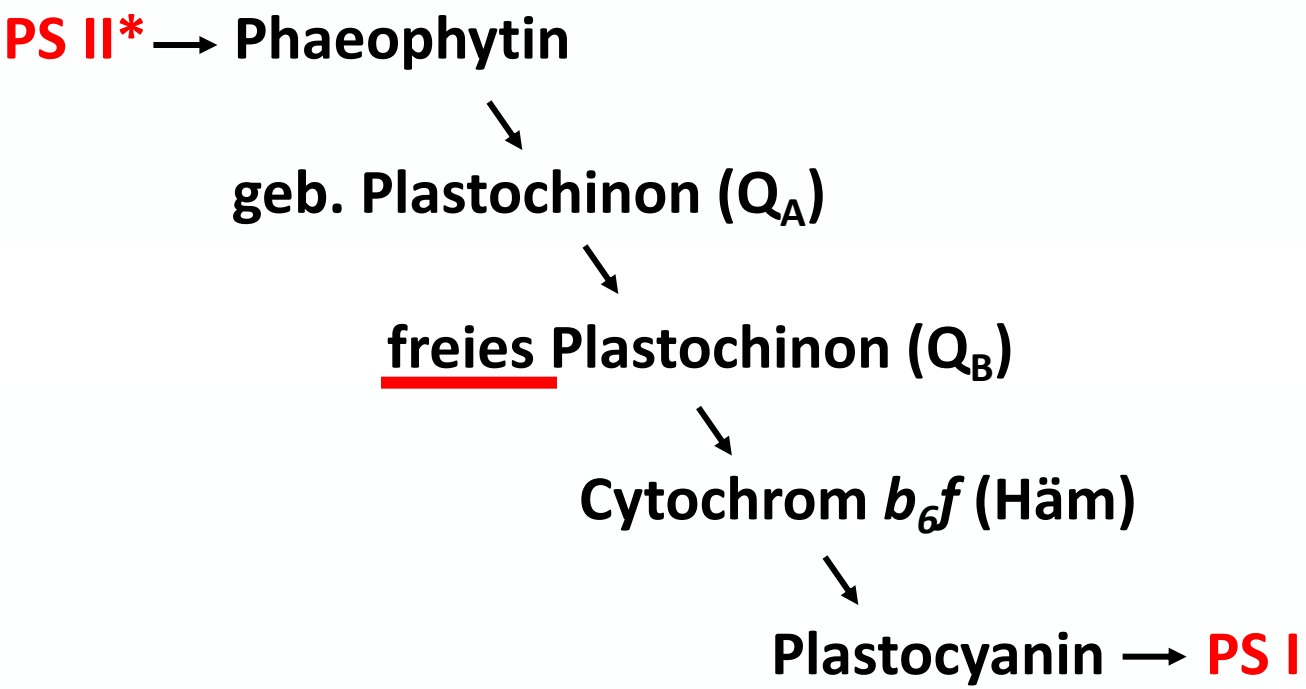
Sauerstoff entsteht in „bursts“



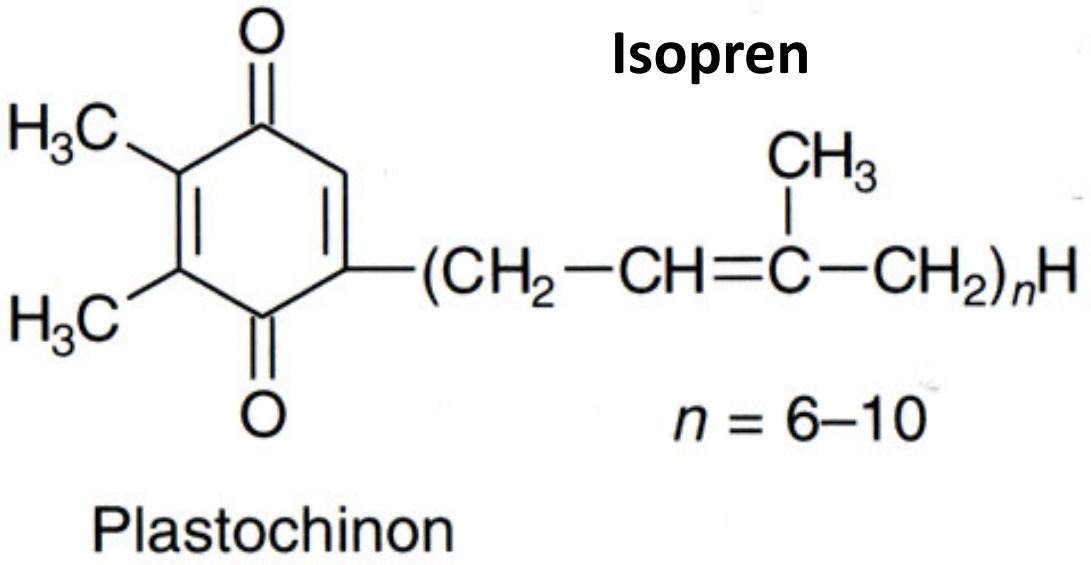
Tyrosin liefert das Elektron

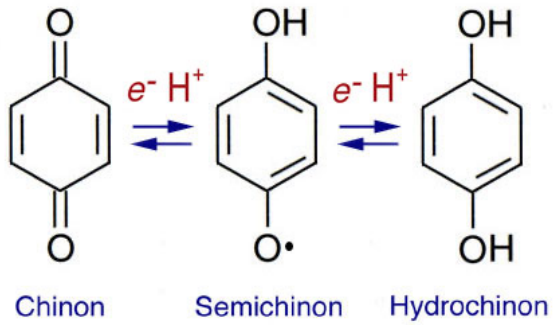


Elektronentransport zum PSI



Der mobile Plastochinon-Pool

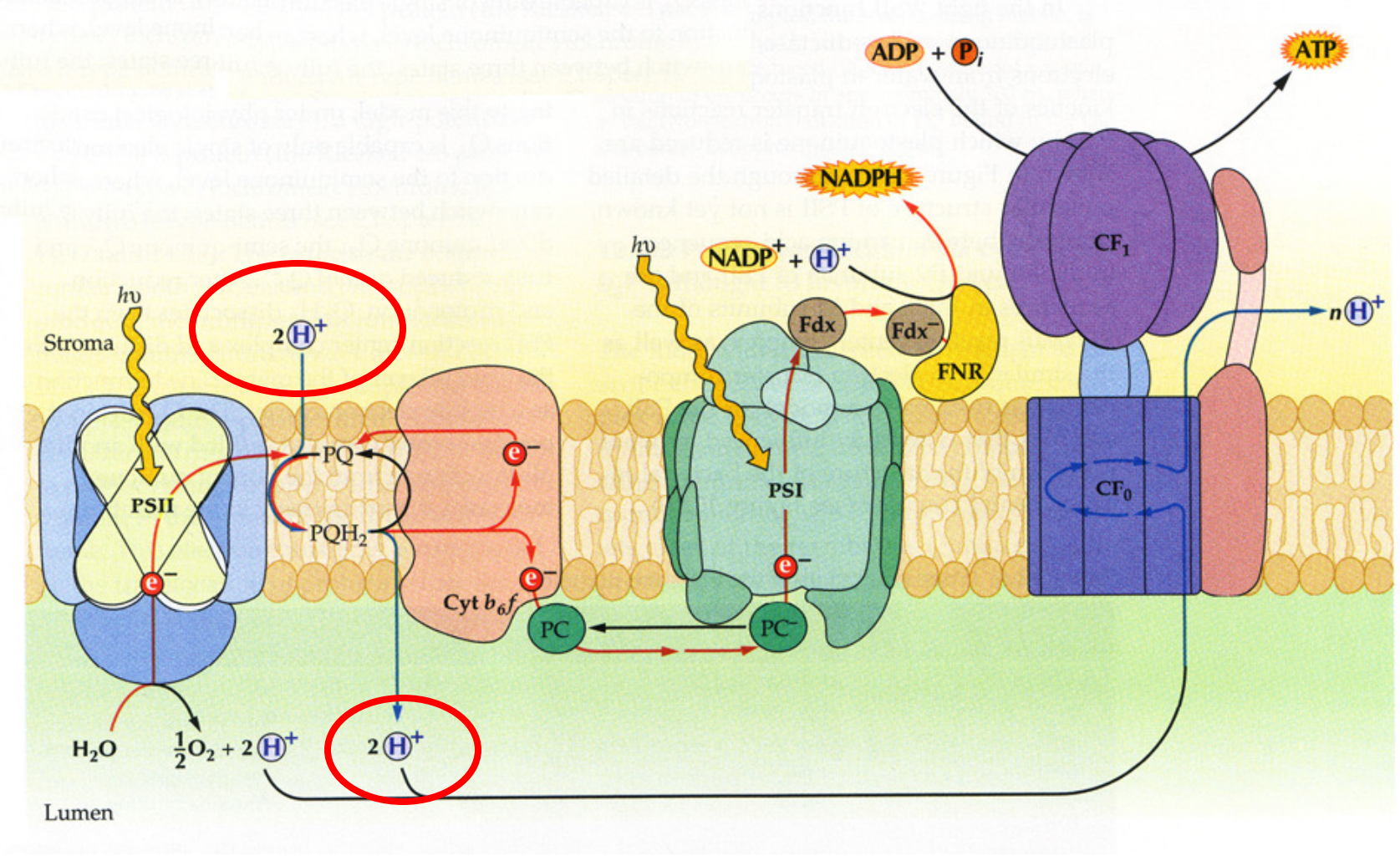




Das Plastochinon ist die einzige Komponente der Elekronentransportkette zwischen PSII und PSI, die neben Elektronen auch H^+ transportiert !!!

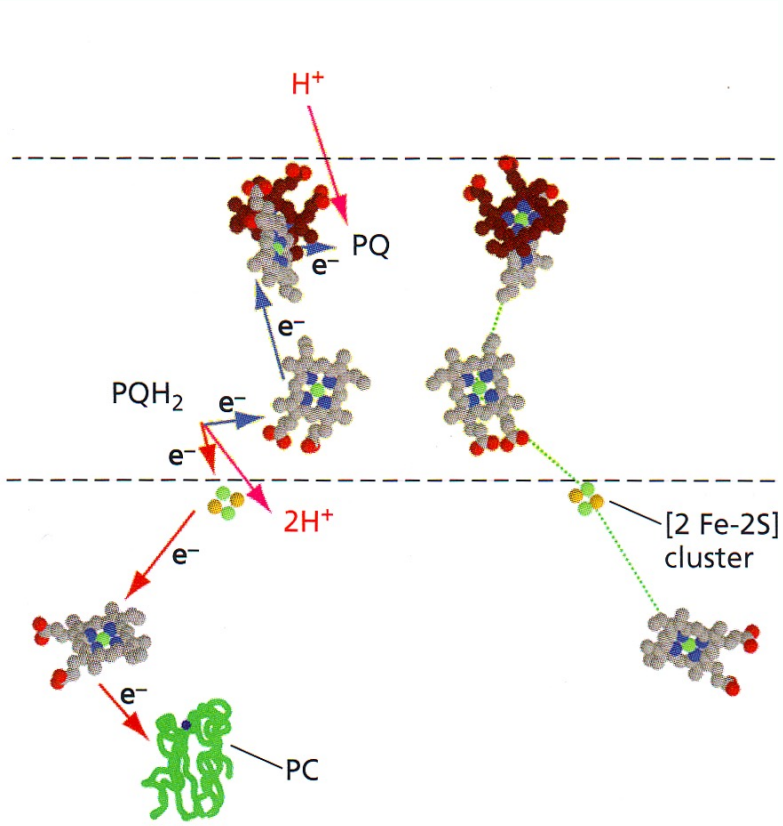
Plastochinon ist in der Thylakoidmembran frei beweglich !!!

Nichtzyklischer Elektronentransport

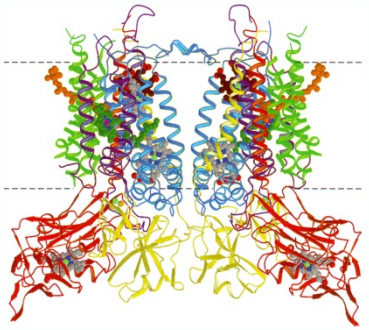


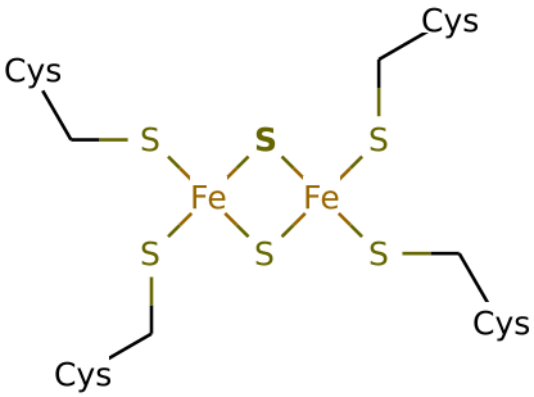
Der Cytochrom b_6f Komplex

Stroma

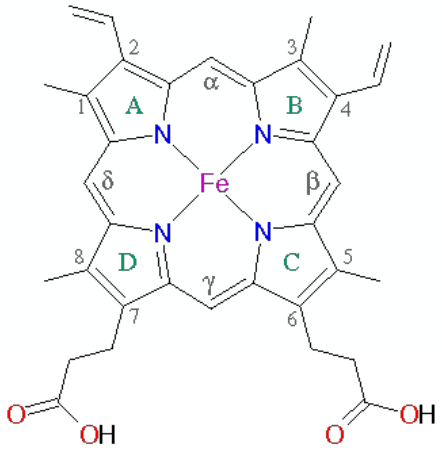


Lumen



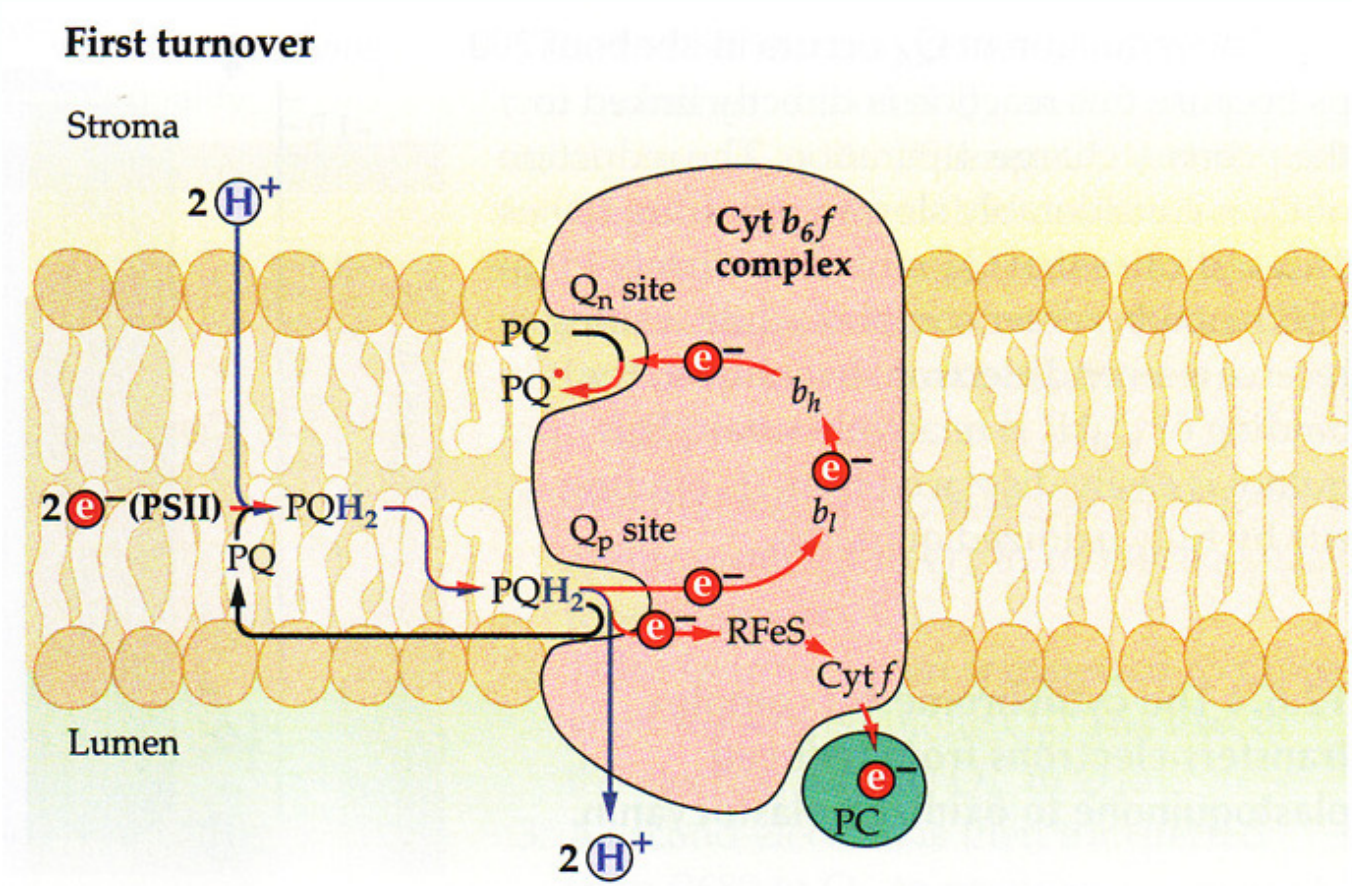


$Fe^{3+} \rightleftharpoons Fe^{2+}$



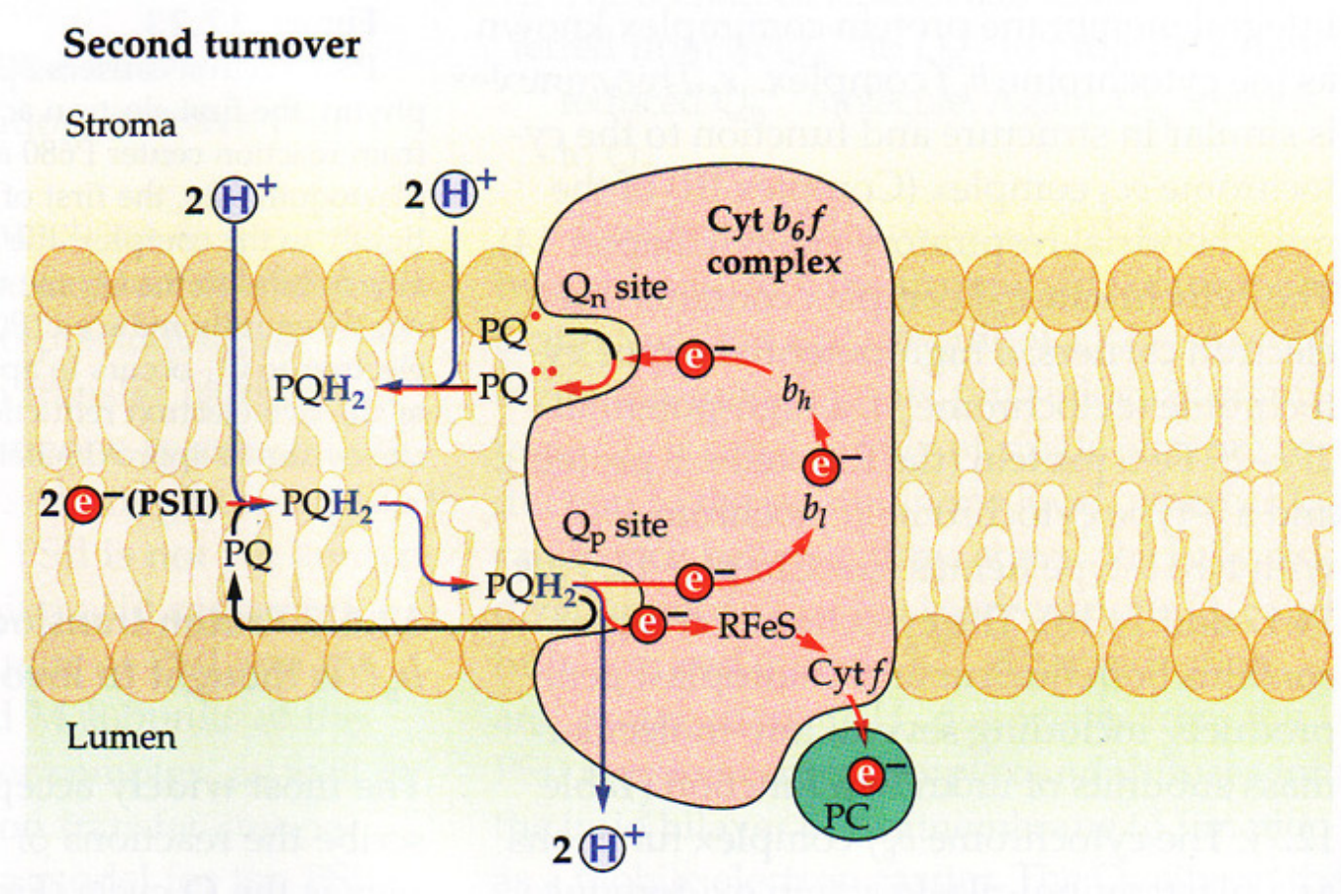
Der Q-Zyklus

. . . ist ein Mechanismus zur Steigerung der H^+-Verschiebung pro Elektron durch das Plastochinon (PQ)!



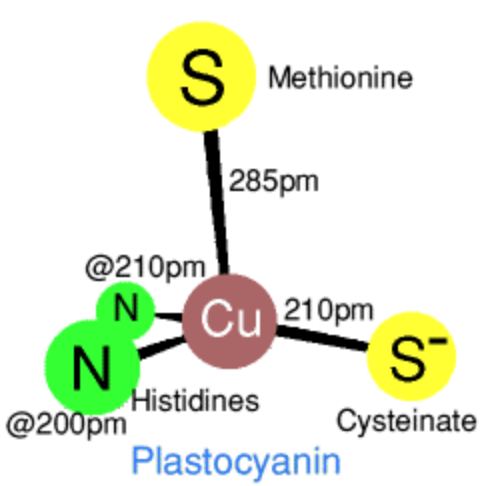
Der Q-Zyklus

. . . ist ein Mechanismus zur Steigerung der H^+-Verschiebung pro Elektron durch das Plastochinon (PQ)!



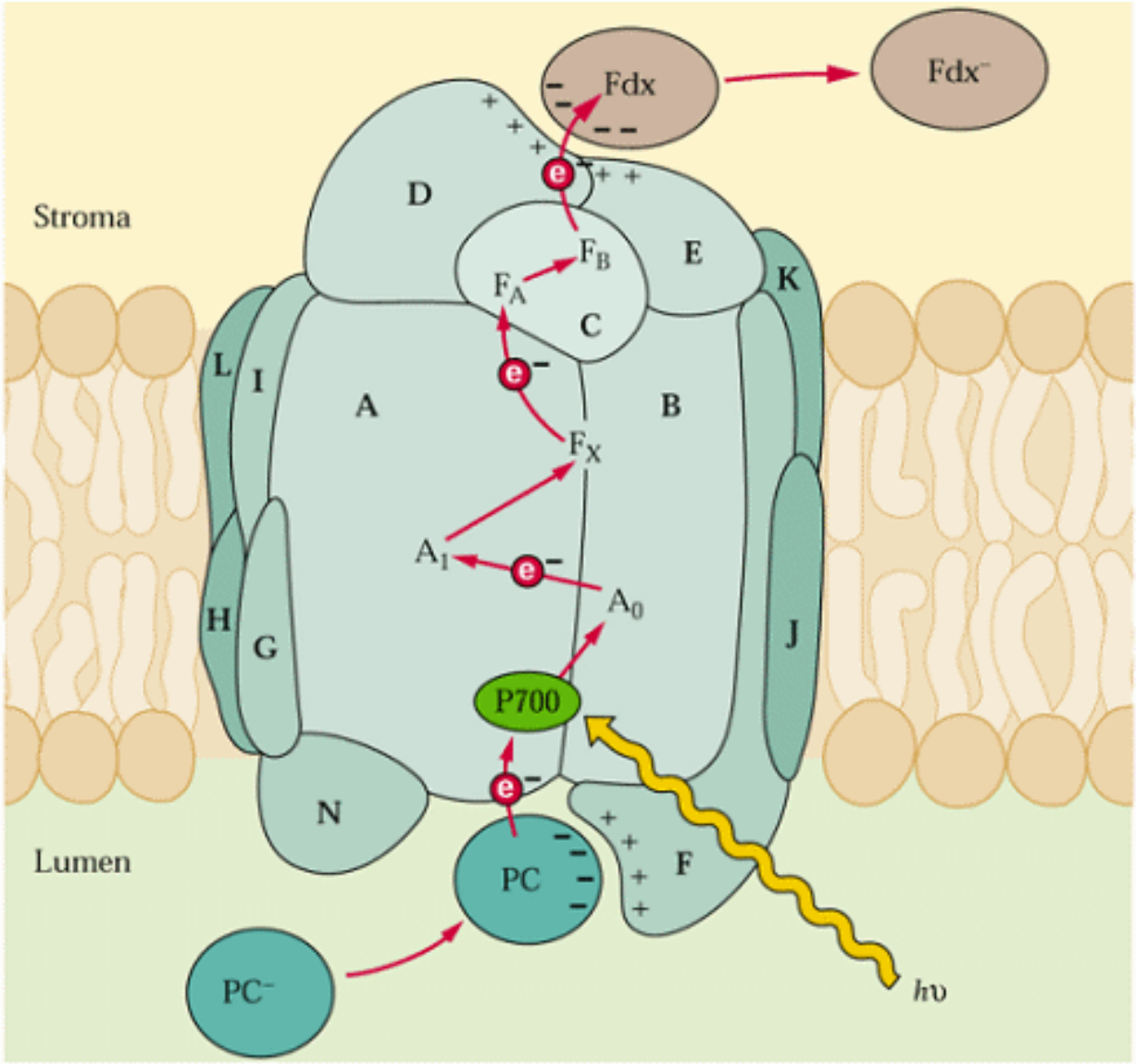
Plastocyanin

- Kleines, kupferhaltiges Protein
- Intensiv blau gefärbt
- Ein Kupfer gebunden über Cys, Met und 2x His
- Wasserlöslich
- Befindet sich im **Thylakoidlumen**
- **Mobiler** Elektronen Carrier zwischen Cyt b_6f und PSI

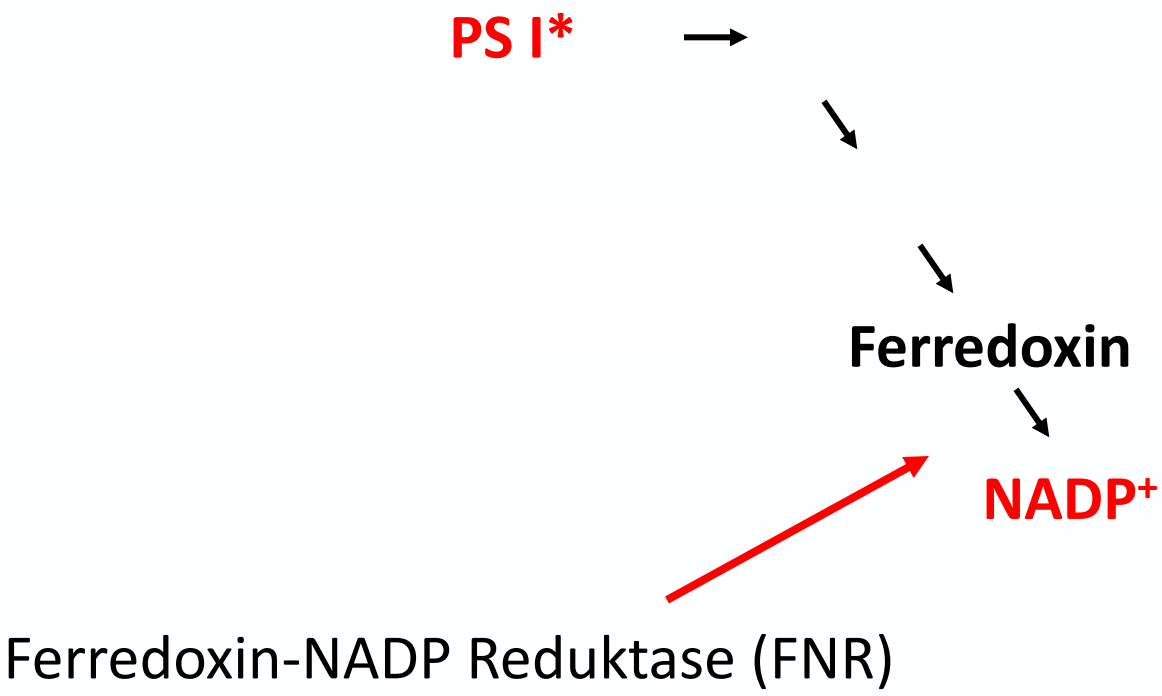


$$Cu^{2+} \rightleftharpoons Cu^{+}$$

Das Photosystem I (PS 700)

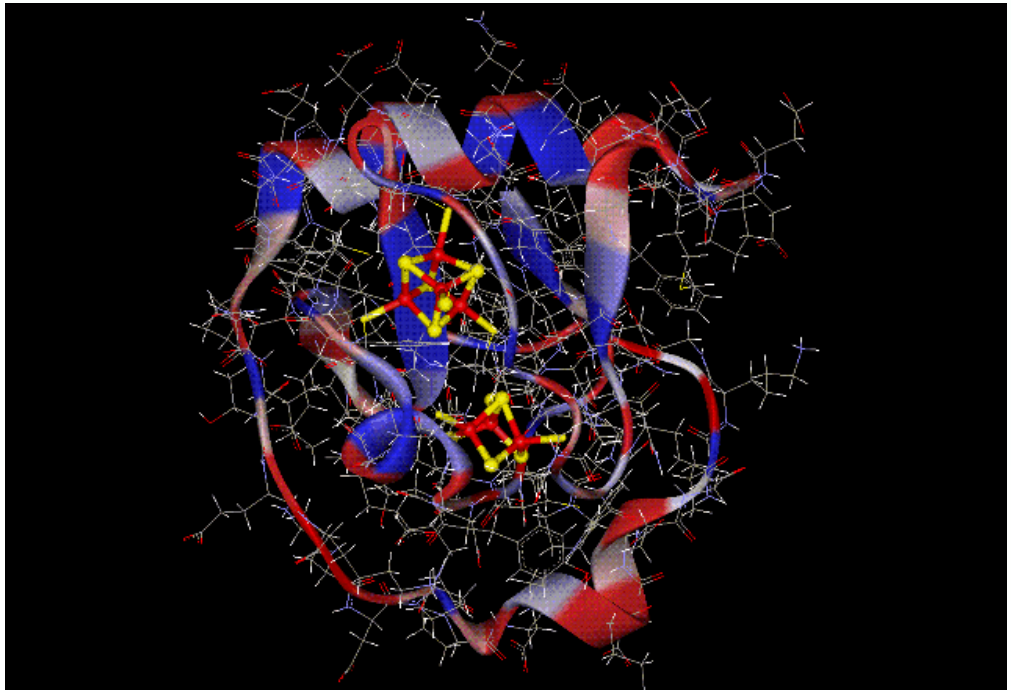


Reduktion von $NADP^+$

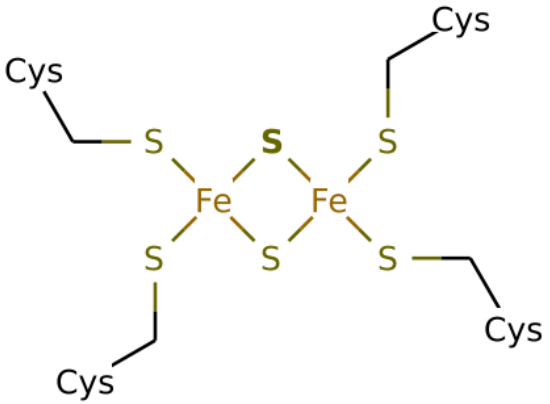


Ferredoxin

- Löslicher Elektronen-Carrier
- **Mobiler** Elektronen-Carrier
- Lokalisiert im **Stroma!!!**

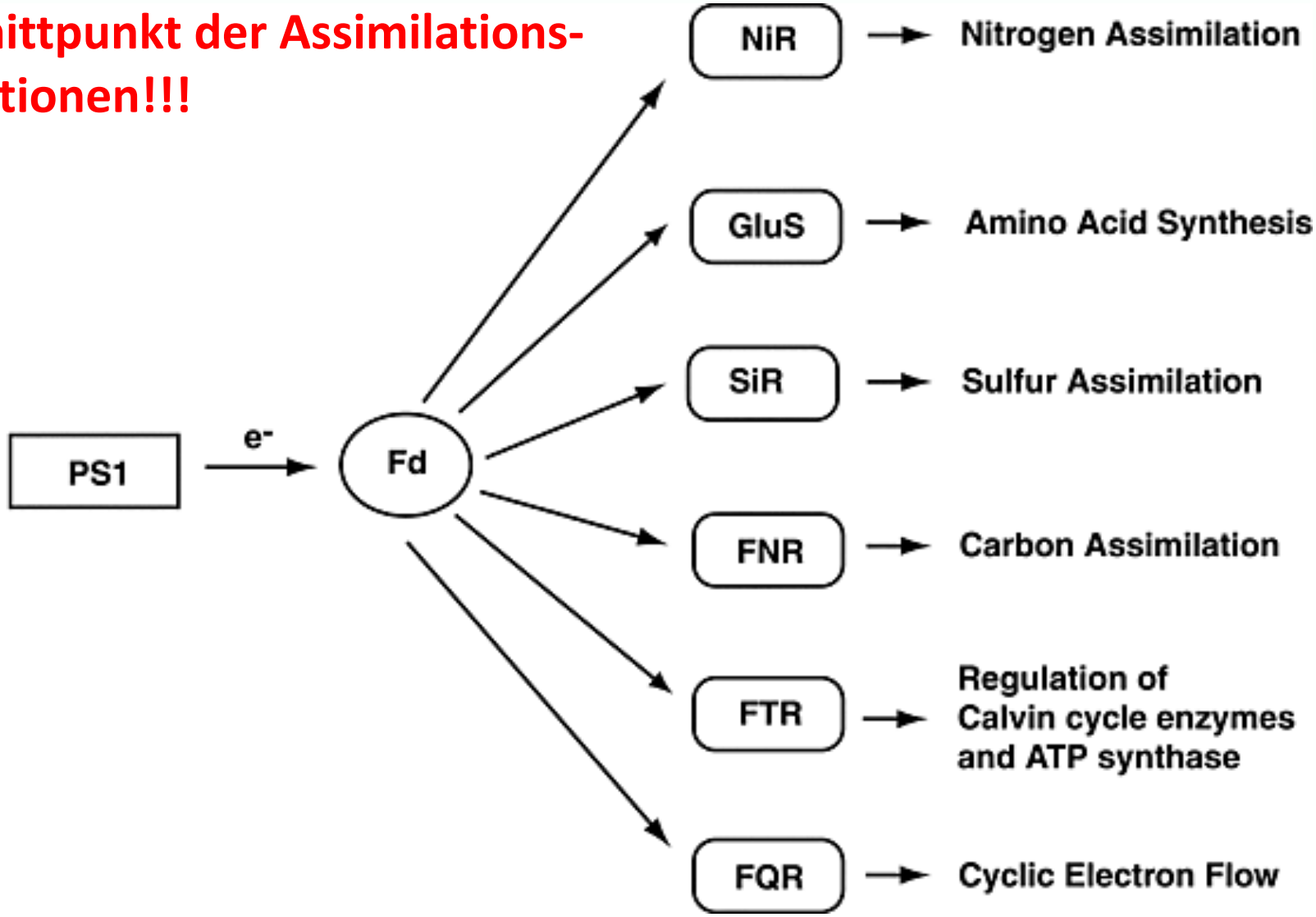


- **Schnittpunkt der Assimilationsreaktionen!!!**



Ferredoxin

Schnittpunkt der Assimilations-reaktionen!!!

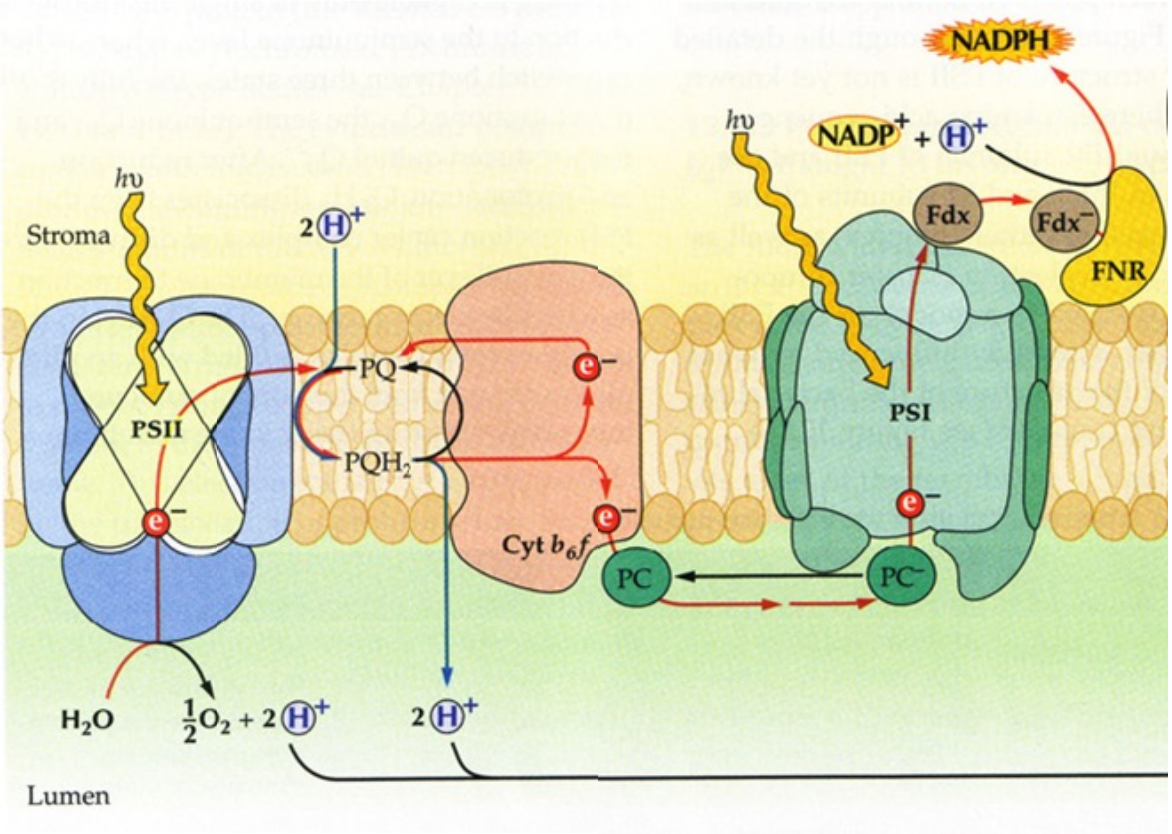


Der Weg der Elektronen

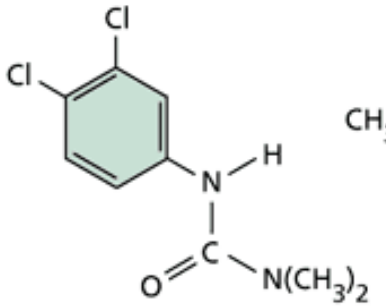
STROMA

Thylakoidmembran

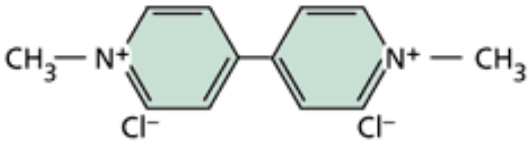
LUMEN



Hemmstoffe der Photosynthese

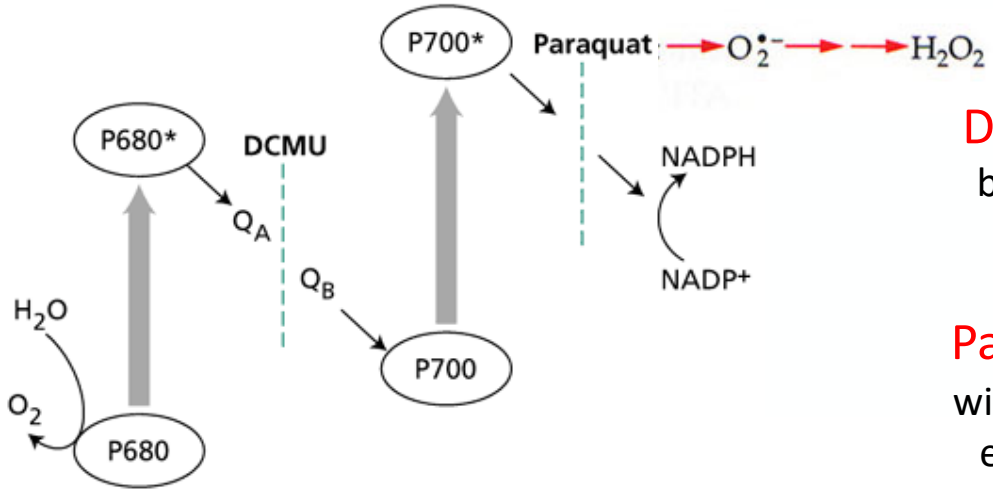


DCMU (diuron)
(Dichlorophenyl-dimethylurea)



Paraquat
(methyl viologen)

Werden als
Herbizide eingesetzt



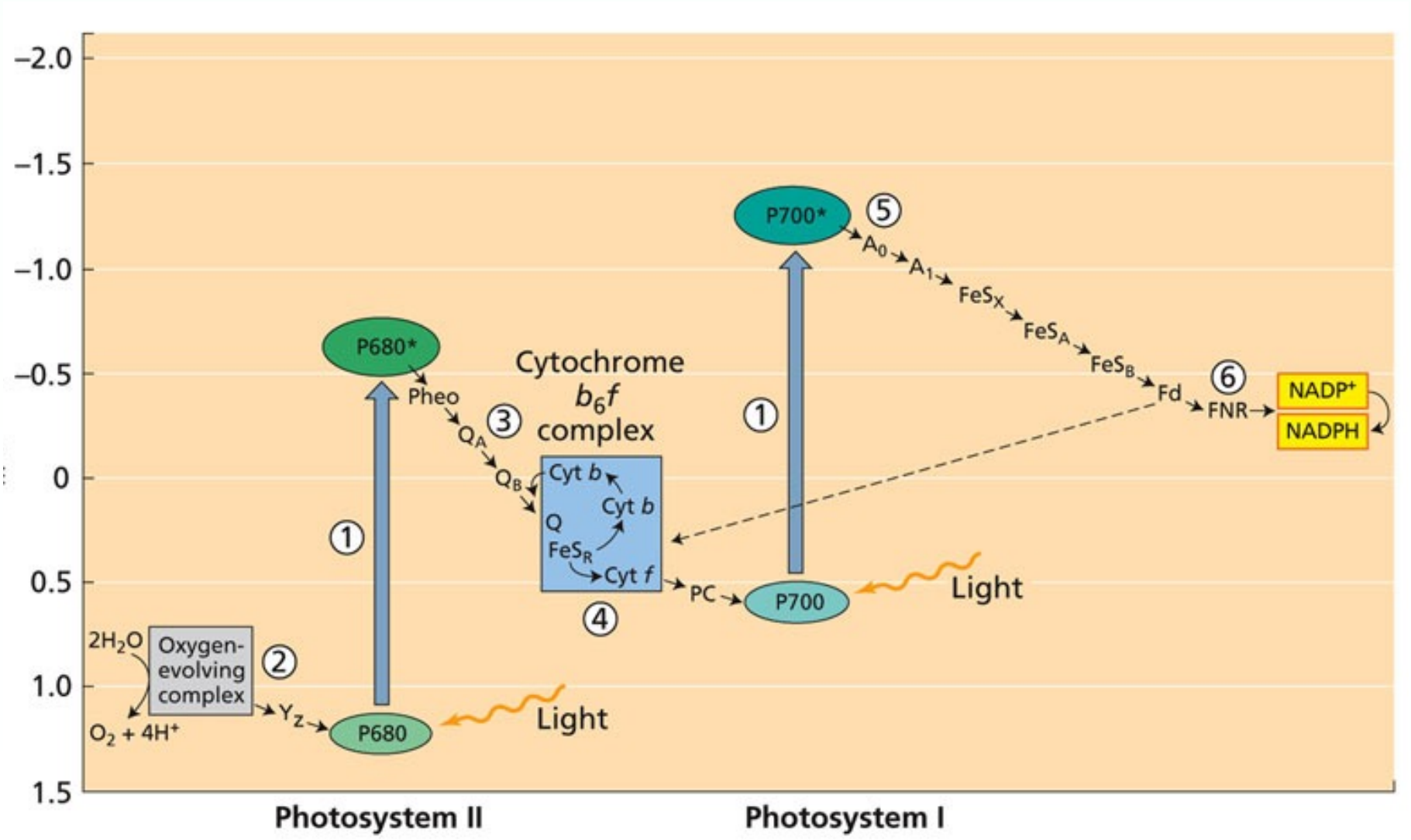
DCMU: Hemmung des e^--Transports

bindet an D1-Protein des PSII und inhibiert e^--Übertragung auf PQ

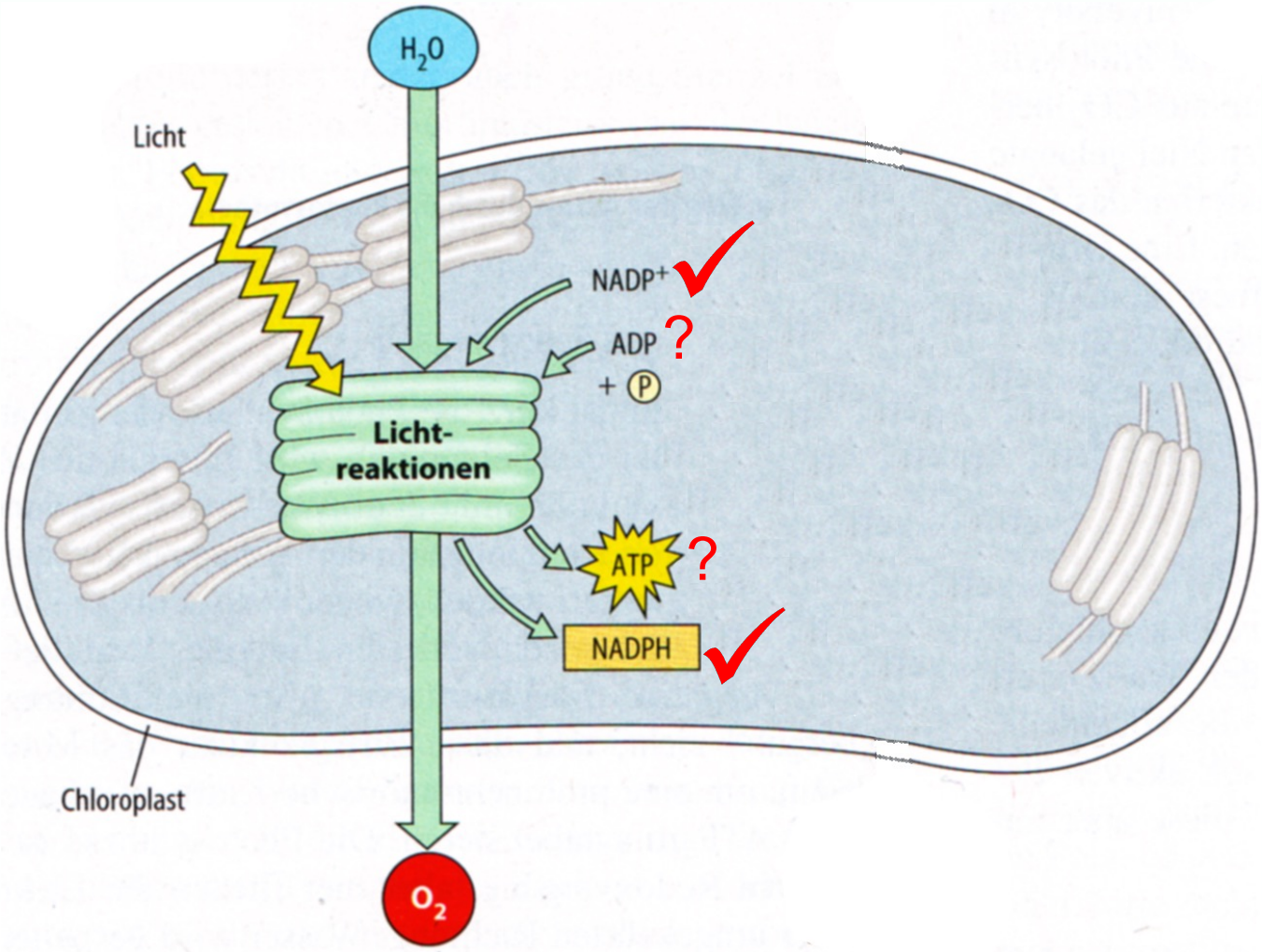
Paraquat: Autooxidation zum Radikal

wirkt als terminaler e^--Akzeptor und überträgt e- auf O_2 ($O_2^{\cdot -}$: Superoxid-Radikal entsteht)

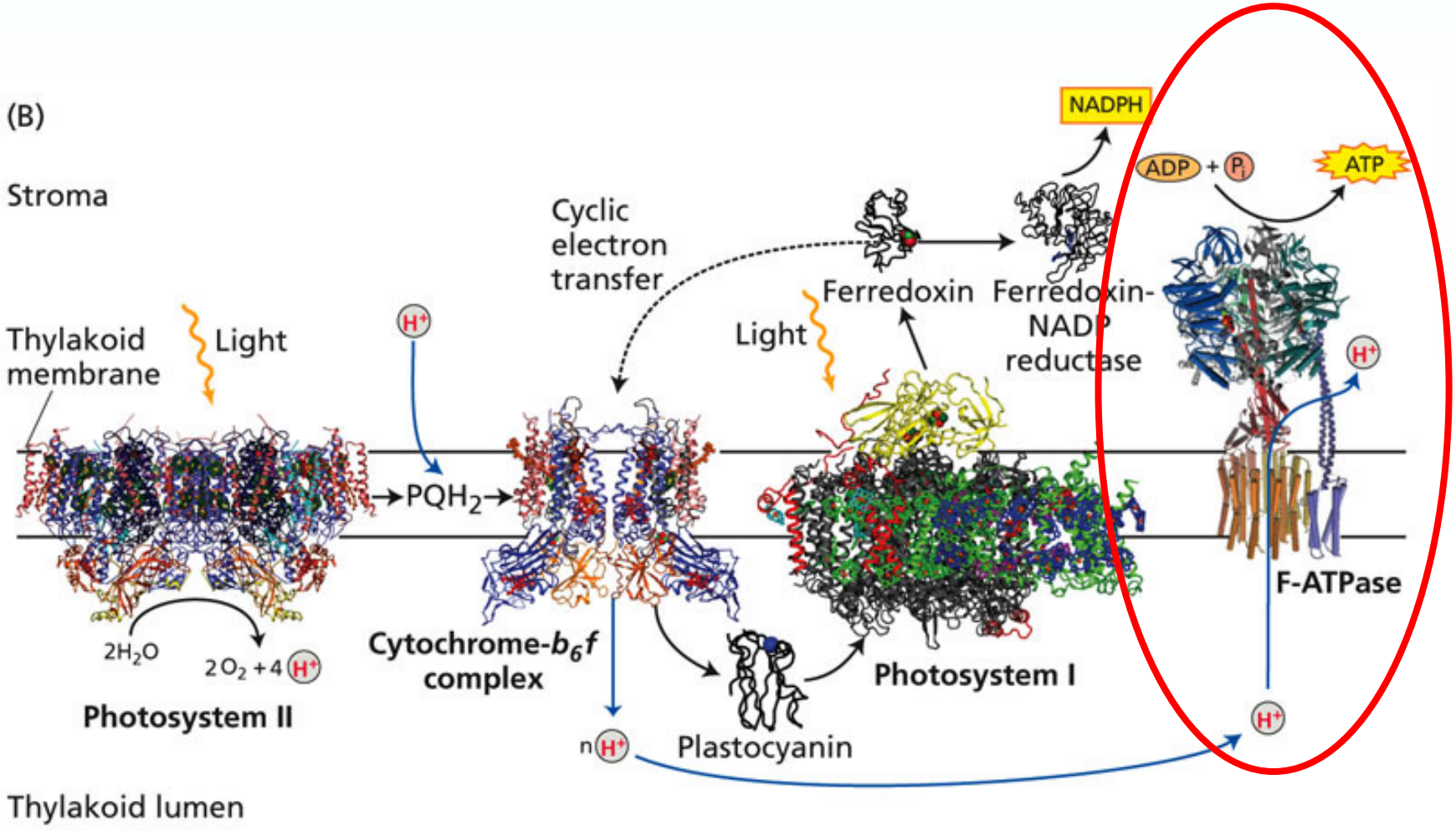
Das Z-Schema der Photosynthese



Umwandlung in chemische Energie



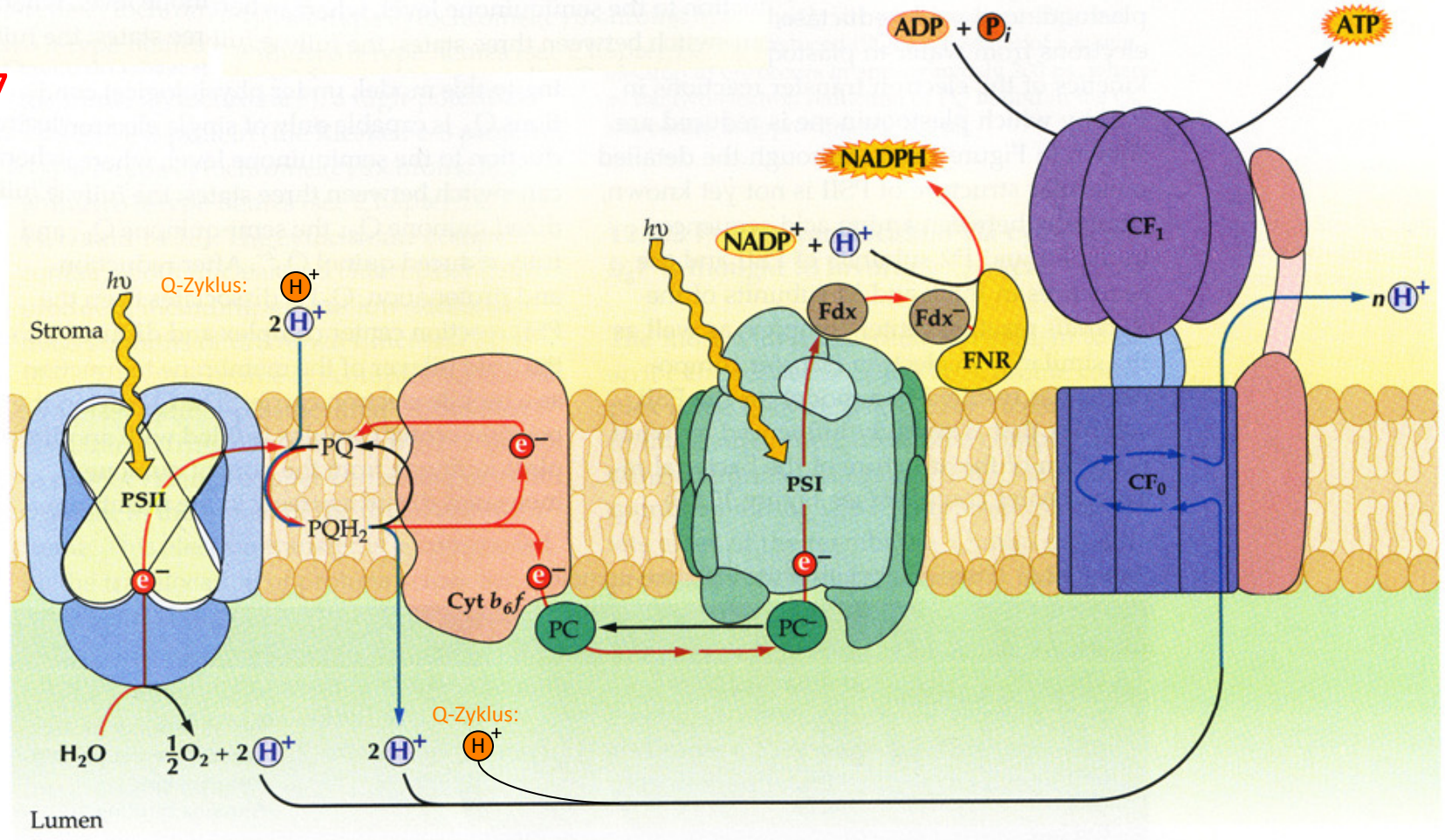
Elektronentransportübersicht



Der Protonengradient

pH ≈ 7

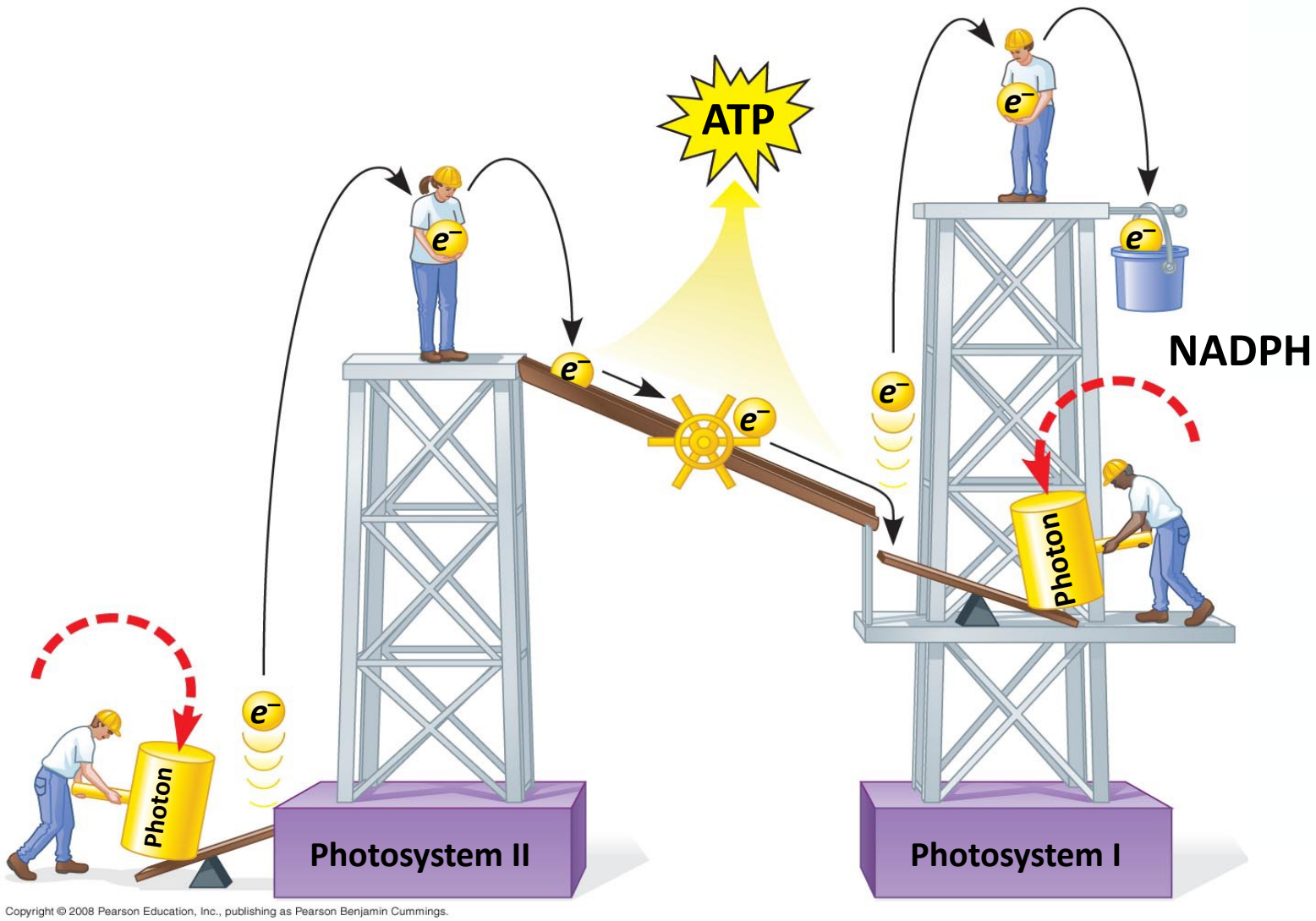
ΔpH ≈ 3



pH ≈ 4

Konzentrationsdifferenz 1:1000 !!!!!!!

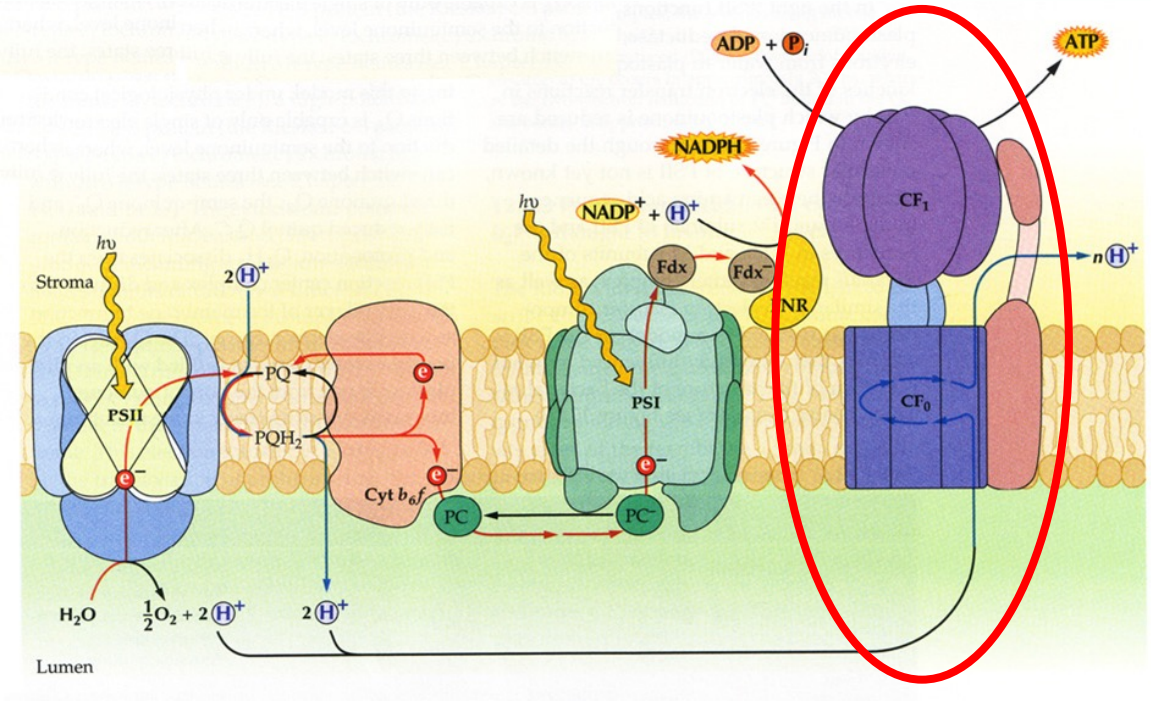
Woher kommt die Energie um die Protonen zu verschieben?



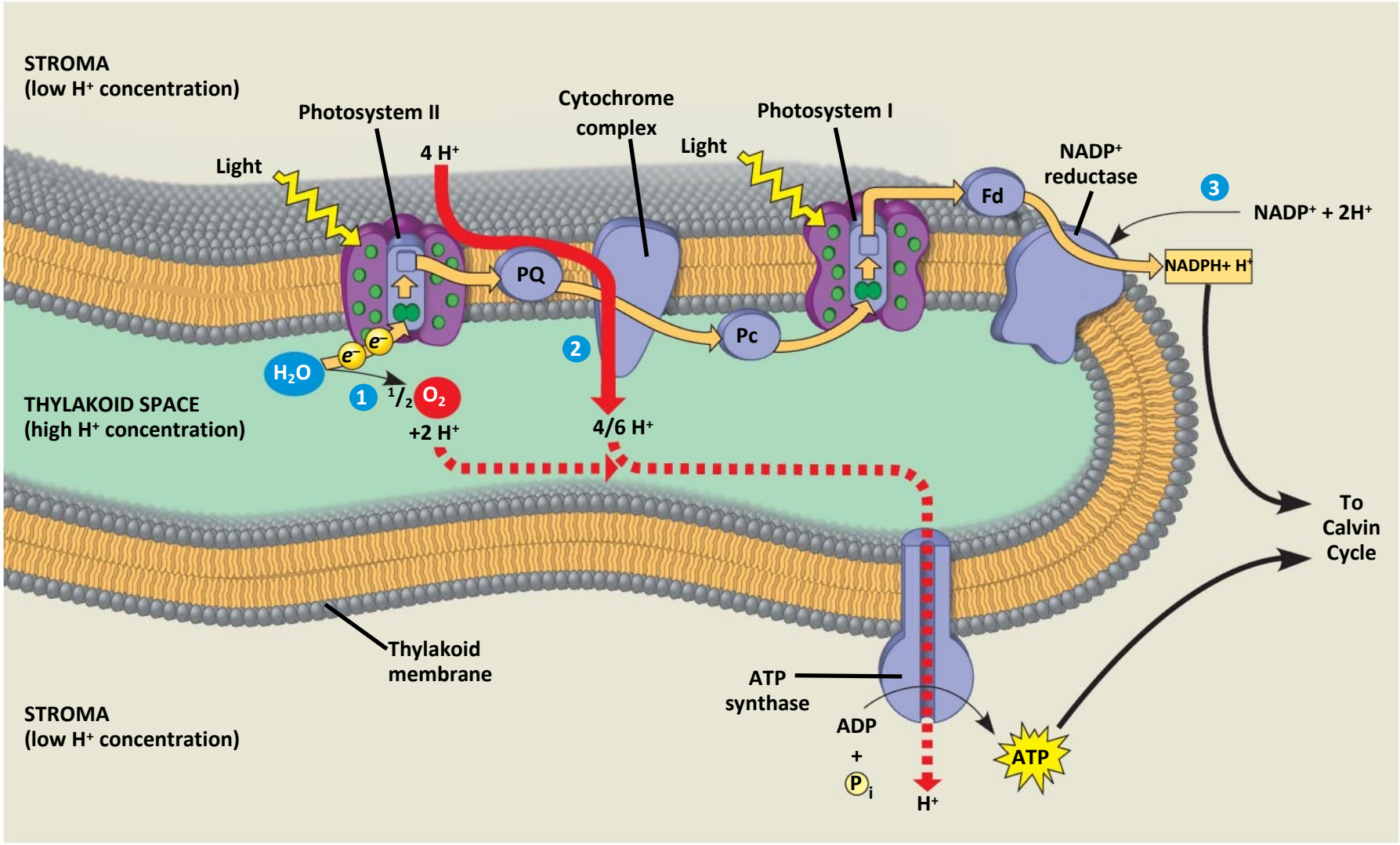
Die Chemiosmotische Hypothese

Peter Mitchell, 1961 (Nobelpreis 1978)

Die Energie, die in einem elektrochemischen Gradienten gespeichert ist, kann zur Synthese von ATP genutzt werden.

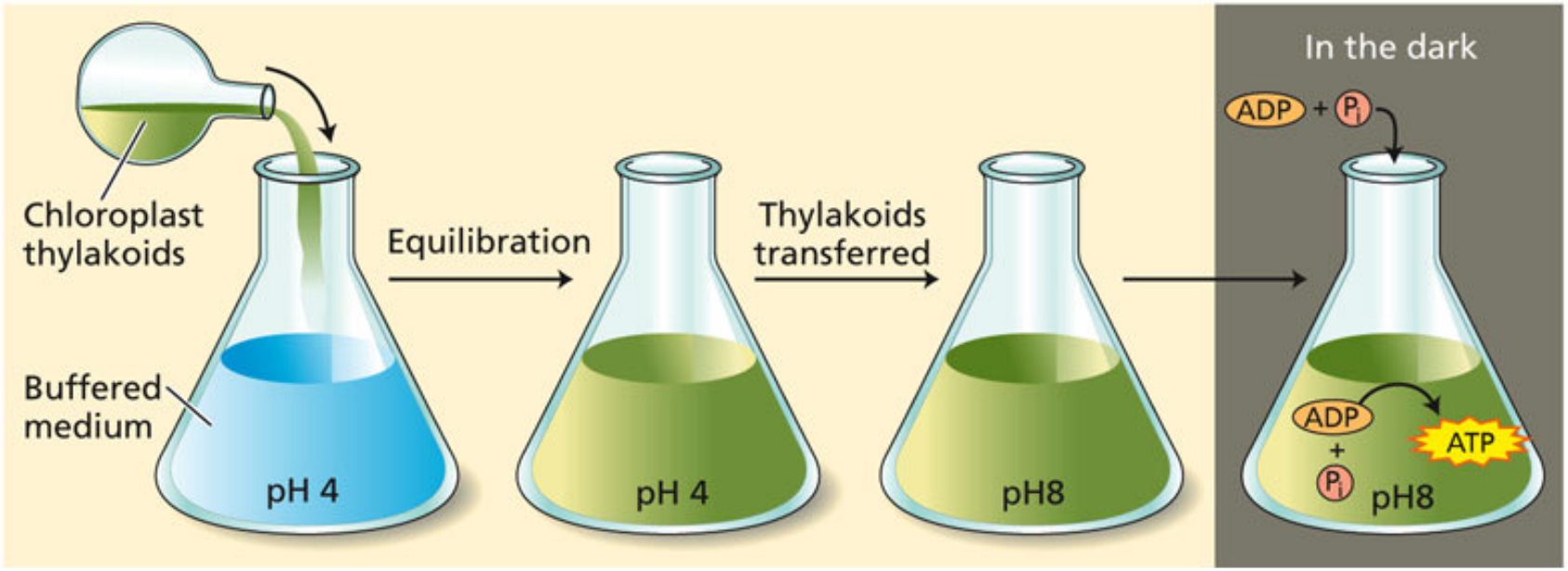


Die räumliche Anordnung der Komplexe



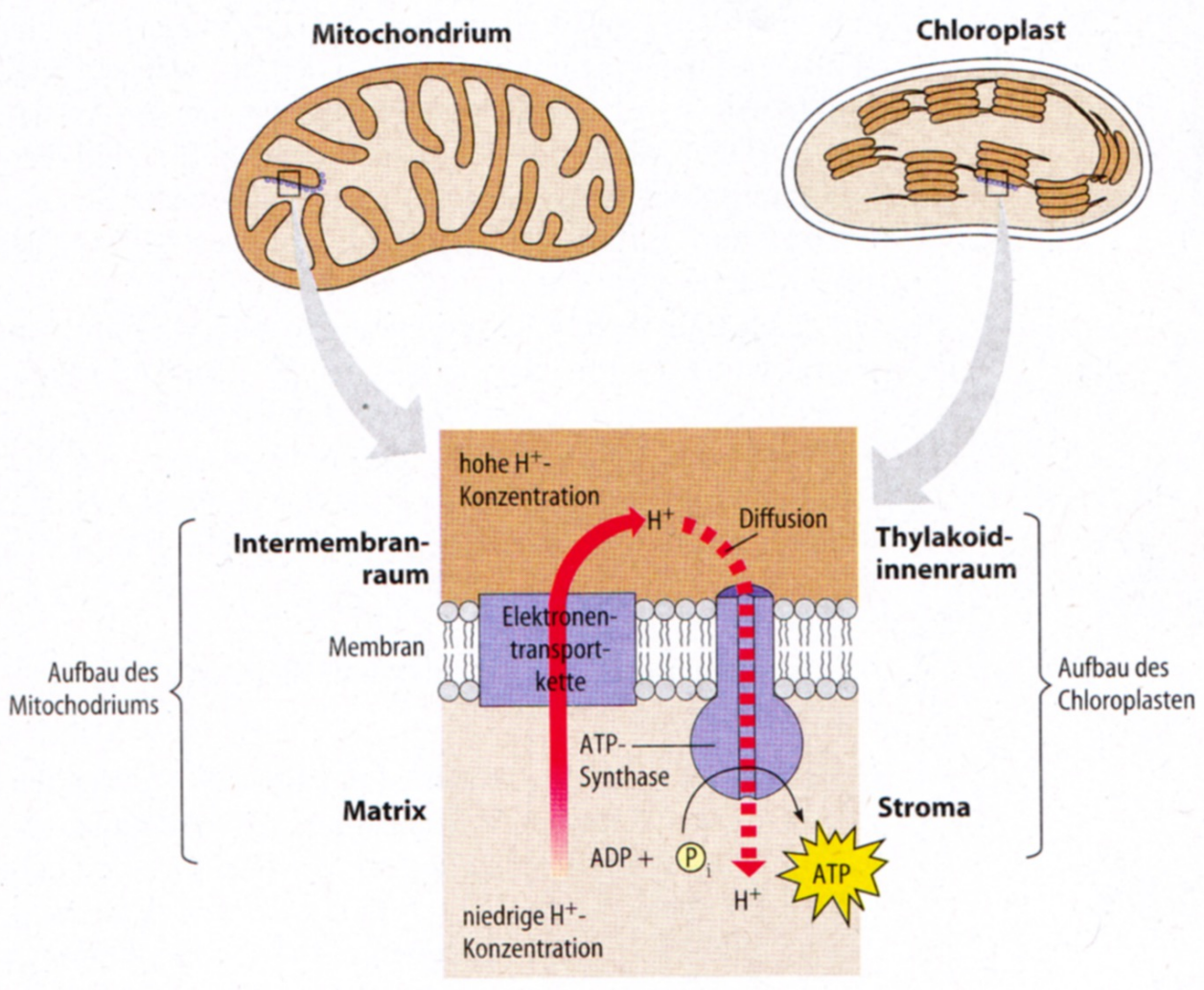
Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Benjamin Cummings.

Das Jagendorfexperiment

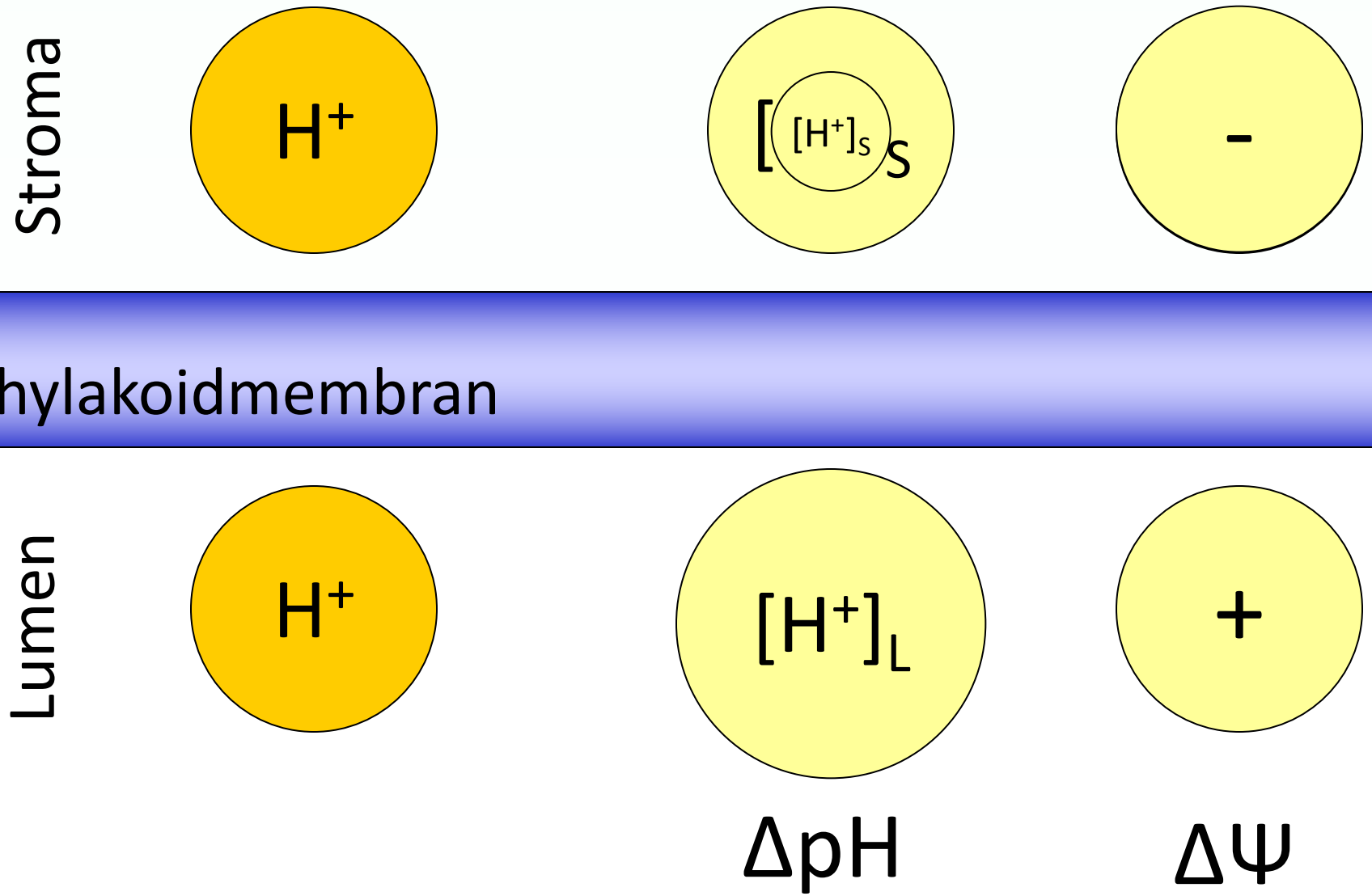


Isolierte Thylakoide können auch im Dunklen ATP aus ADP und Phosphat synthetisieren, wenn ein **elektrochemischer Gradient** über die Thylakoidmembran vorliegt

Oxidative und Photophosphorylierung



Membranpotential und pH-Gradient



Die protonenmotorische Kraft (PMK)

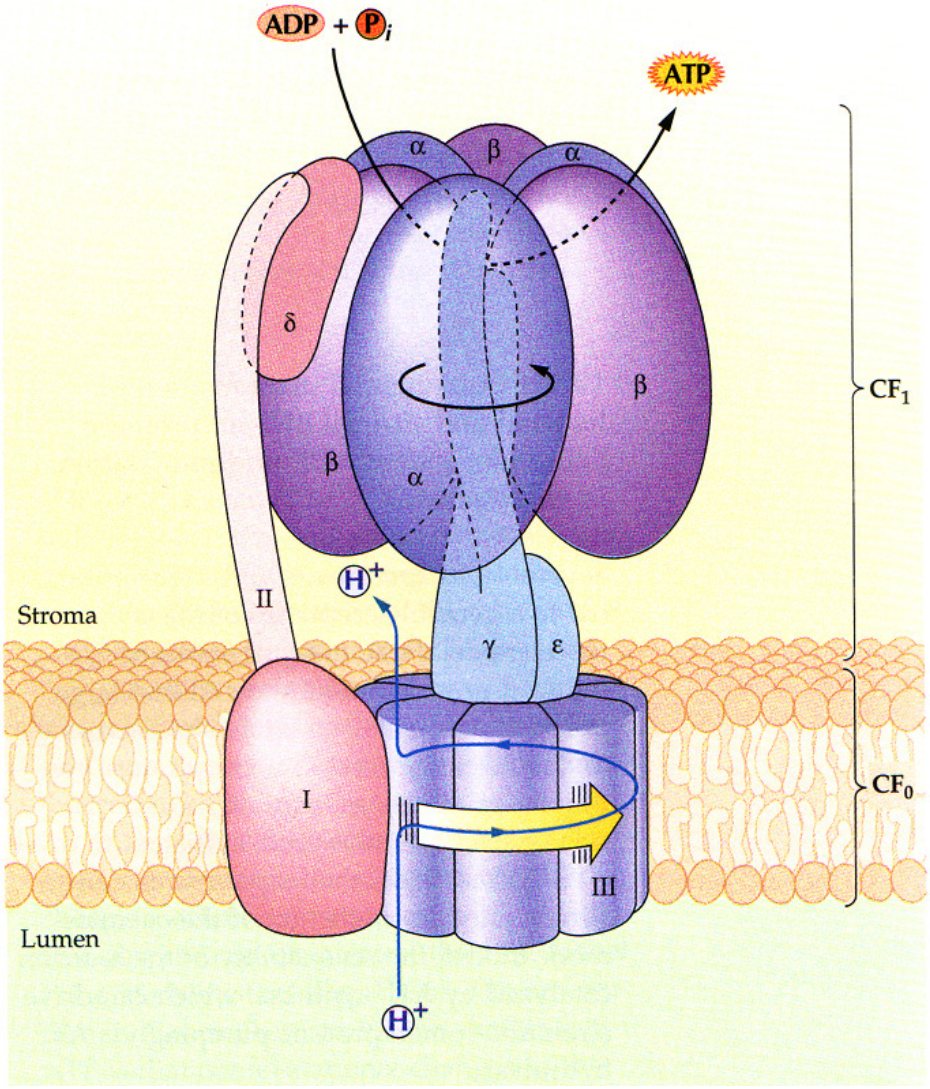
Protonenmotorische Kraft

$$\mathrm{PMK}\ (\Delta\mu\mathrm{H}^+) = \Delta p = \frac{\Delta G}{F} = -2{,}3\,\frac{RT}{zF}\cdot\Delta pH + \Delta\psi$$

$$\Delta p = -0{,}059\cdot\Delta pH + \Delta\psi(V)$$

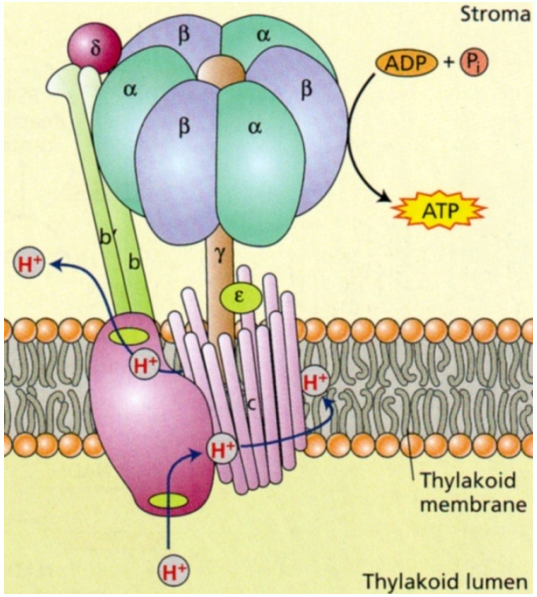
1V entspricht 96 kJ/mol

Die (C)F_o/(C)F_1-Typ H^+ - ATPase...



... ist ein durch Protonen getriebener Rotationsmotor; sie nutzt den durch den Elektronen-transport aufgebauten H^+-Gradienten zur ATP-Synthese

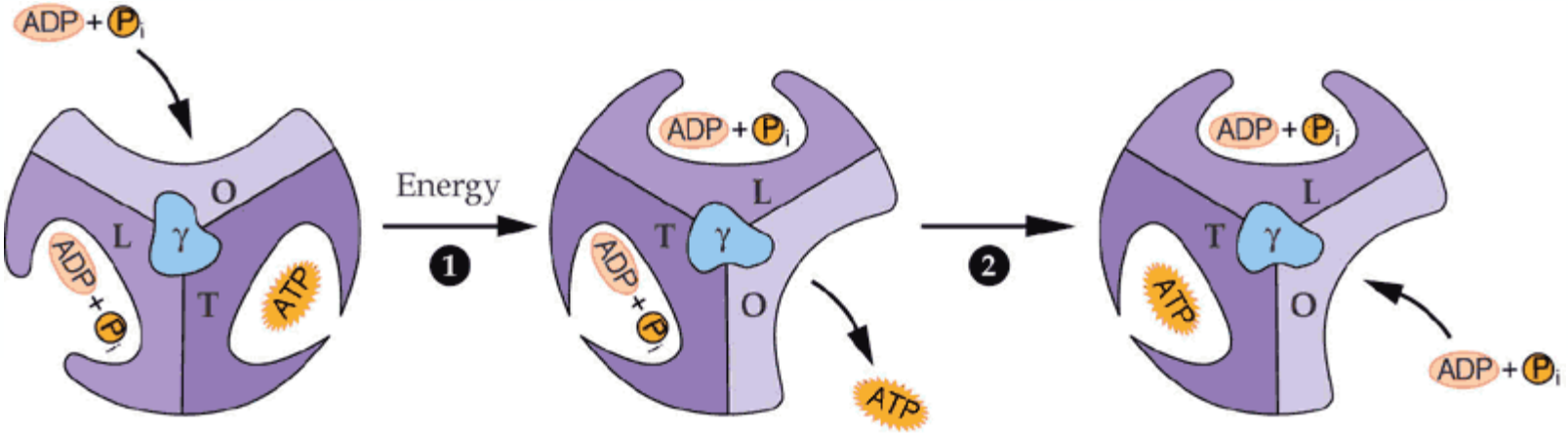
Konformationsänderungen der F1 Untereinheit



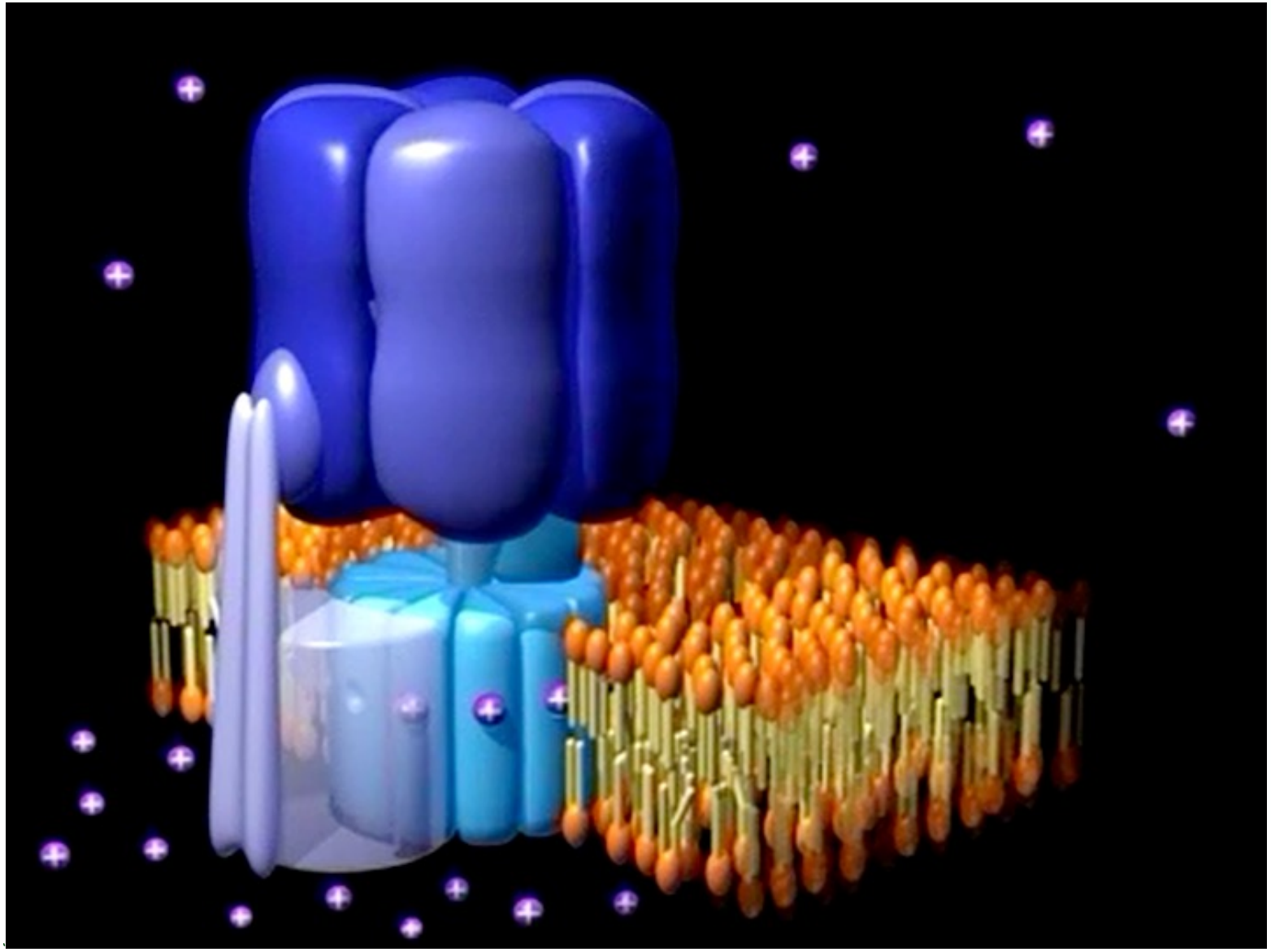
β Untereinheit F1

3 Konformationen

OPEN
LOOSELY
TIGHT



ATP-Synthese

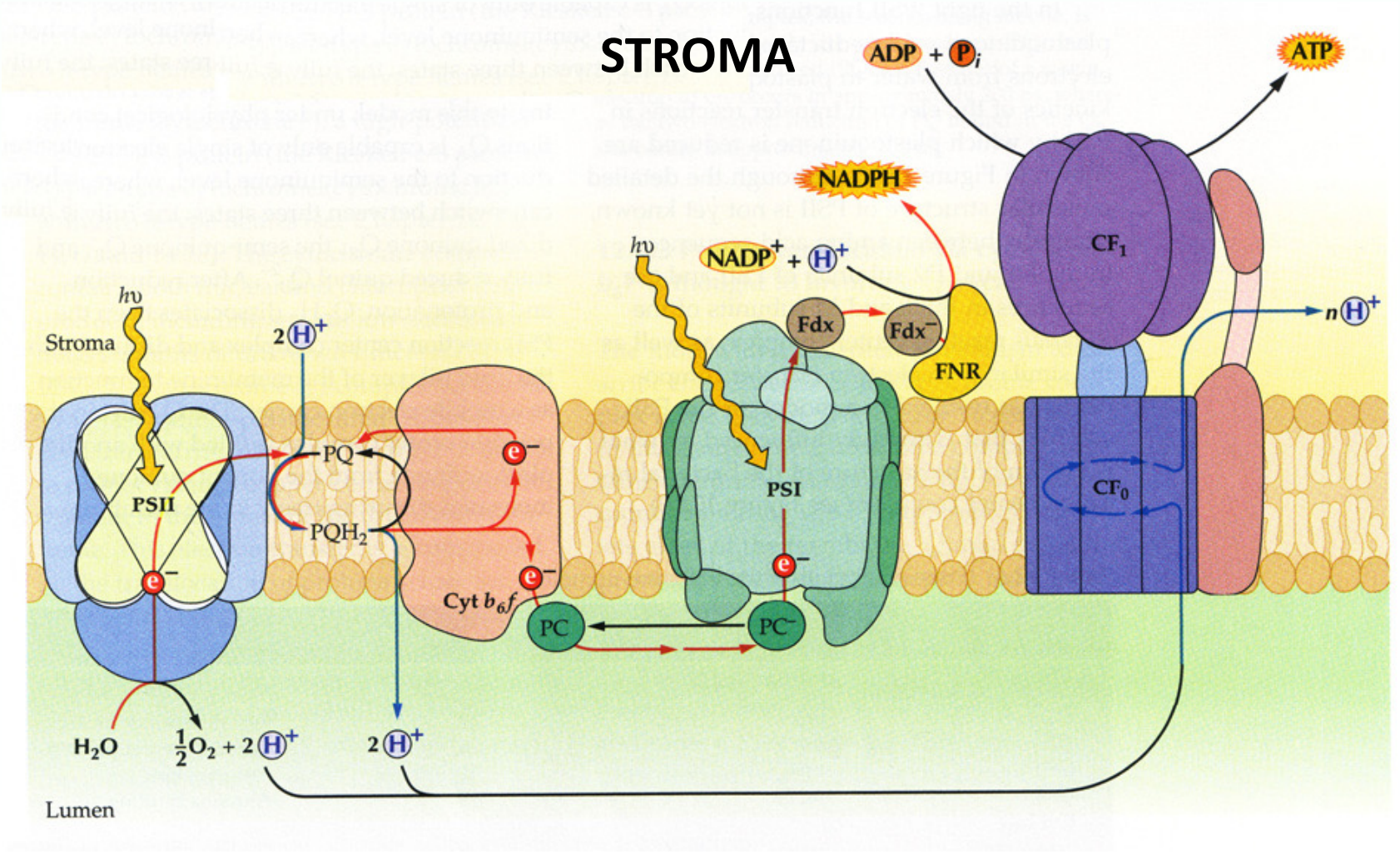


H^+/ATP-Stöchiometrie

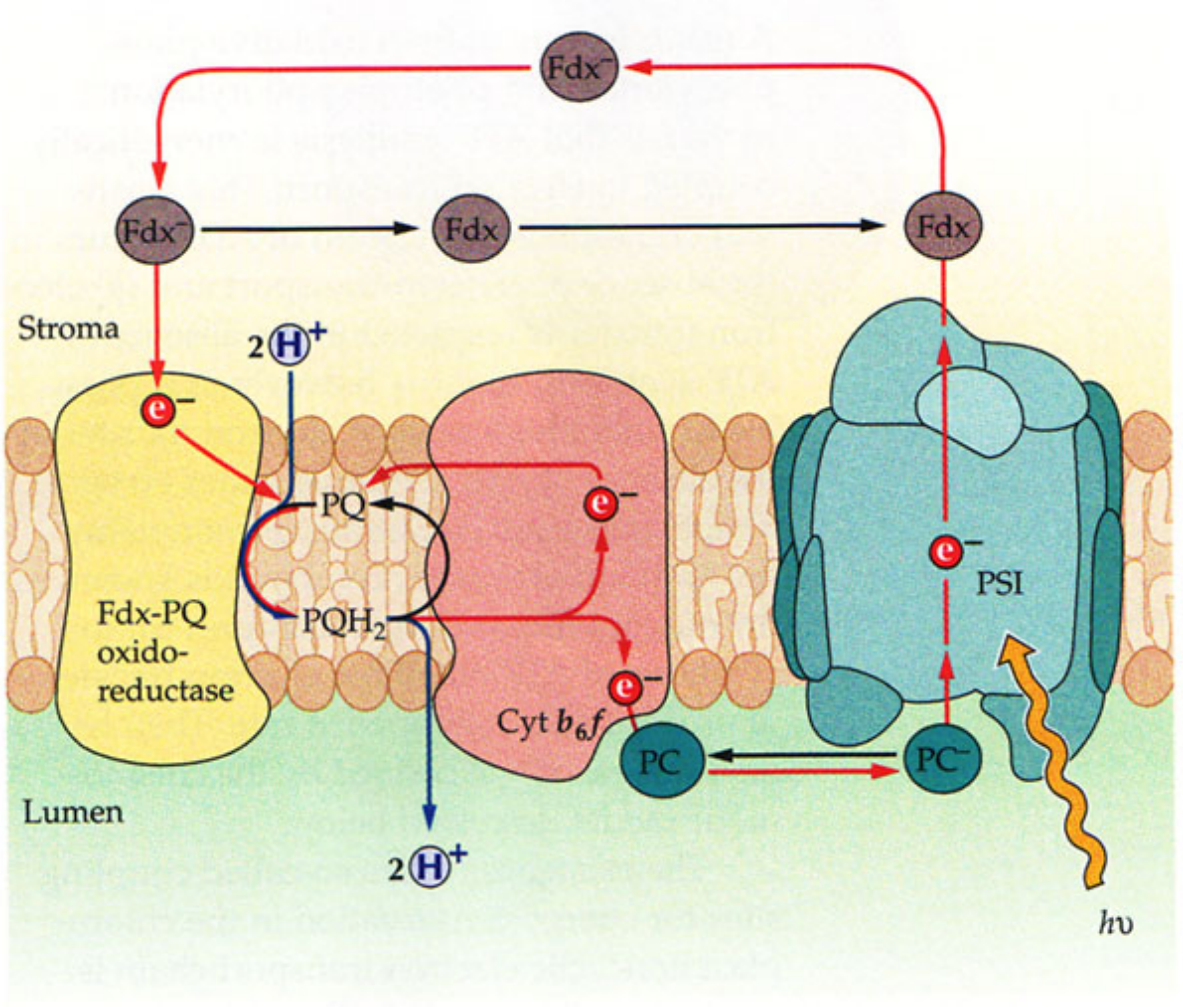
Der CF_0-Rotor ist aus unterschiedlich vielen c-Untereinheiten aufgebaut. Daraus resultiert eine unterschiedliche H^+/ATP-Stöchiometrie für die ATP-Synthese.

Organismus	*Anzahl c-UE*	*$H^+(Na^+)$/ATP Verhältnis*
Escherichia coli	12	4
Mitochondrien Hefe	10	3,3
Chloroplasten Spinat	12	4
Na^+-ATPase (*E.coli*)	11	3,7

Nicht-Zyklischer Elektronentransport

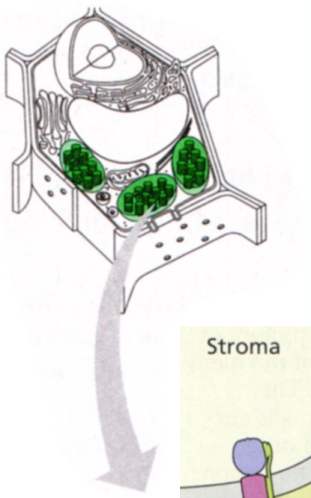


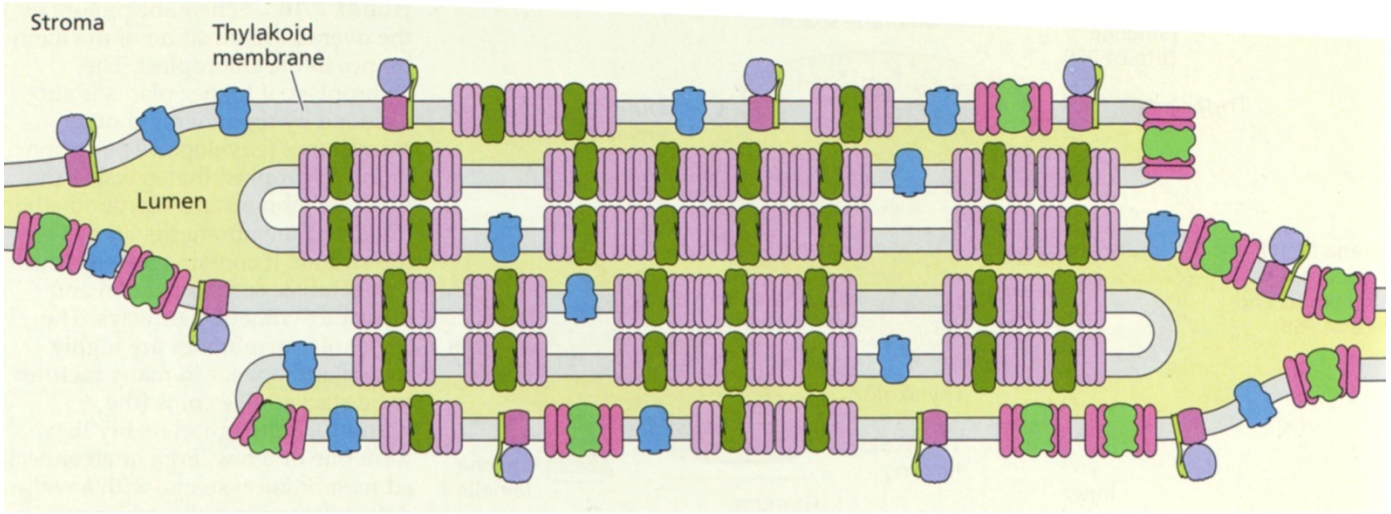
Zyklischer Elektronentransport

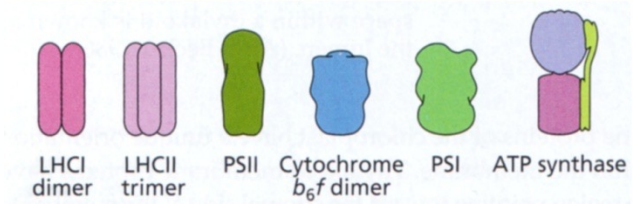


Nutzt nur das PSI und überträgt die Elektronen nicht auf $NADP^+$, sondern über einen Cofaktor zurück auf Plastochinon

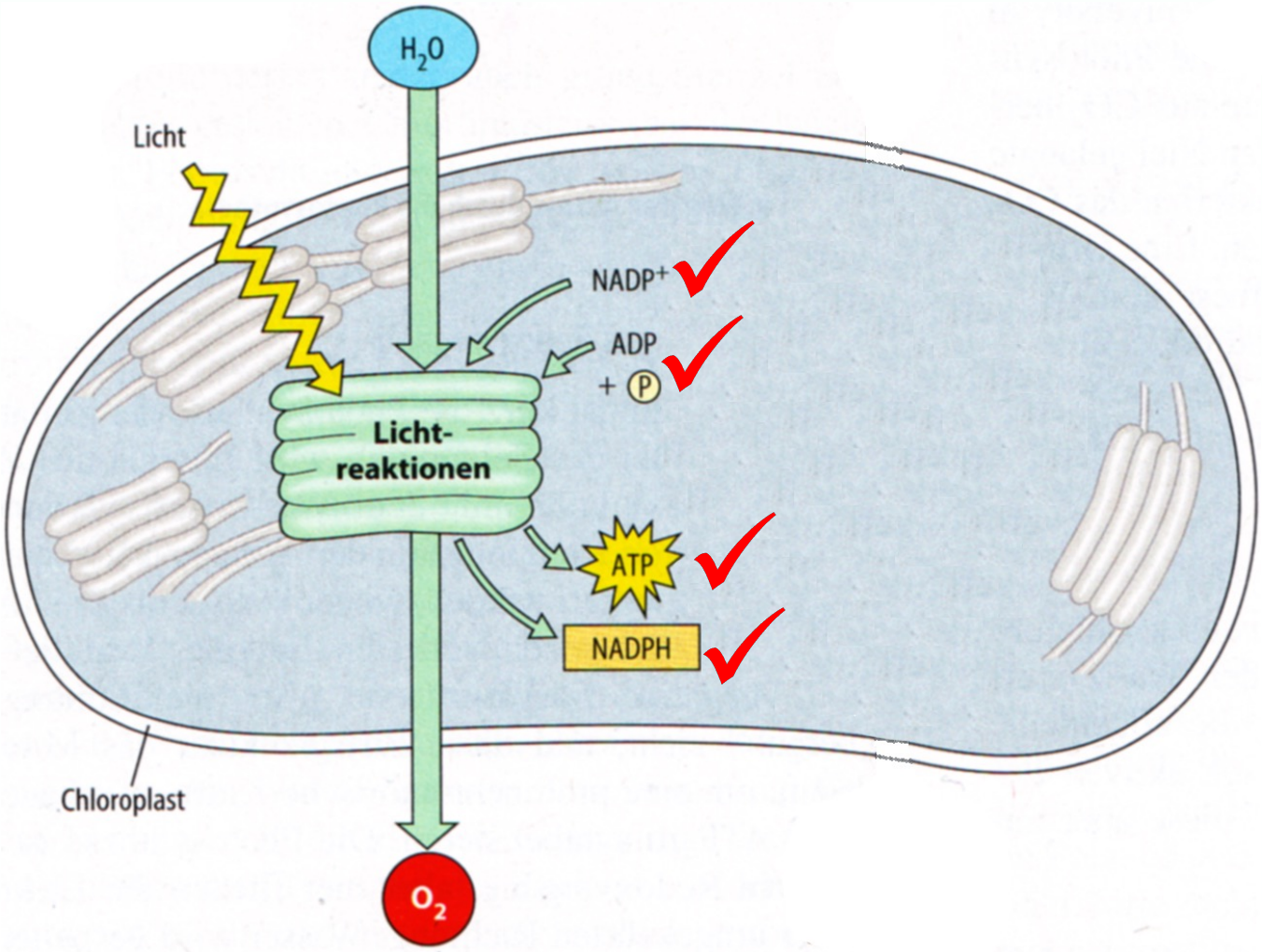
Anordnung der Proteinkomplexe







Produkte der Lichtreaktion



Energieausbeute der Lichtreaktion?

- pro O_2:
  - 2 NADPH + H^+ ($\Delta G^{0\,'}$: +218 kJ/mol)
  - 8 - 12 H^+ → 2 - 3 ATP ($\Delta G^{0\,'}$: +30,5 kJ/mol)
- pro mol O_2:
  - 497 kJ

Dazu müssen mindestens 8 mol Photonen absorbiert werden

→ für Rotlicht (700nm) bei einer Energie ($E = hc\lambda^{-1}N_A$) von

8 mol x 170 kJ/mol → 1360 kJ/mol

8160 kJ/6 mol O_2

$12H_2O + 6CO_2 \rightarrow 6O_2 + C_6H_{12}O_6 + 6H_2O$ $\quad \Delta G^{0\,'} = +2872$ kJ/mol

Wirkungsgrad der Photosynthese

Rotes Licht: 2872/8160 ⇒ 35%